

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

**Studium topografie povrchu materiálu  
vytvořeného pulzujícím vodním paprskem**

**Study of Material Surface Topography Created  
by Pulsating Water Jet**

Student:

Bc. Ondřej KLICH

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.

Ostrava 2013

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Klich**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Studium topografie povrchu materiálu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem  
Study of Material Surface Topography Created by Pulsating Water Jet

Zásady pro vypracování:

1. Prostudovat základní literaturu a provést literární rešerši.
2. Studium základů technologie pulzujícího vodního paprsku.
3. Studium metrologie drsnosti.
4. Nastudovat měřicí metody topografie povrchu.
5. Definovat závislost parametrů topografie povrchu k technologii pulzujícího vodního paprsku.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Bumbálek, B., Odvody, V., Ošťádal, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL 1989
- [2] Mlčoch, L., Slimák, I.: *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL 1987
- [3] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.
- [4] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1997.
- [5] Foldyna, J., L. Sitek, J. Ščučka, P. Martinec, J. Valíček, K. Páleníková. 'Effects of Pulsating Water Jet Impact on Aluminium Surface', *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, No. 20, 6174-6180, 2009.
- [6] Summers D. A., *Waterjetting Technology*. 1st edition, Oxford, 1995, ISBN 0-419-19660-9

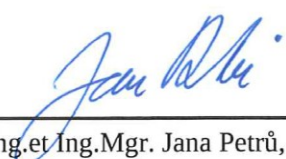
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. května 2013



.....

podpis studenta

### **Prohlašuji, že**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. května 2013



.....  
podpis

Ondřej KLICH

1. Máje 410, Suchdol nad Odrou 742 01

**Poděkování:**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. za cenné rady, důležité připomínky a metodické vedení práce.

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

KLICH, O. Studium topografie povrchu materiálu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013, 52 s. Diplomová práce, vedoucí VALÍČEK, J.

Diplomová práce popisuje princip působení technologie pulzujícího vodního paprsku na povrch materiálu a zařízení, které je využíváno pro generování PWJ. Věnuje se studiu topografie povrchu materiálu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem vzhledem k platným normovaným parametrům technologické drsnosti povrchu. Dále se zabývá analýzou získaných dat geometrických parametrů topografie povrchu a jejich následné interpretaci.

## **ANNOTATION OF DIPLOMA'S WORK**

KLICH, O. Study of Material Surface Topography Created by Pulsating Water Jet. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2013, 52 p. Diploma's Work, tutor VALÍČEK, J.

The diploma thesis describes the principle of action of pulsating water jet technology on the material surface and equipment, that is used to generate PWJ. It is studying the surface topography created by pulsating water jet due to the prevailing standardized technological parameters of surface roughness. It is also dealing with analysis of the data obtained geometrical parameters of the surface topography and their subsequent interpretation.

## OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>SEZNAMY .....</b>	<b>8</b>
Seznam zkratk.....	8
Seznam symbolů.....	9
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
<b>2 HISTORIE KAPALINOVÉHO PAPRSKU .....</b>	<b>12</b>
2.1 Rozdělení kapalinových paprsků.....	12
2.2 Klasifikace pulzujících paprsků .....	13
2.2.1 Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí .....	13
2.2.2 Přerušované paprsky .....	14
2.2.3 Modulované paprsky .....	15
<b>3 TECHNOLOGIE PULZUJÍCÍHO VODNÍHO PAPRSKU .....</b>	<b>16</b>
3.1 Princip působení pulzujícího vodního paprsku .....	16
3.2 Zařízení pro pulzující vodní paprsek .....	18
3.2.1 Vysokotlaká vodní pumpa .....	18
3.2.2 Ultrazvukový generátor.....	19
3.2.3 Akustický generátor.....	19
3.2.4 Trysky .....	20
3.2.5 Polohovací zařízení .....	20
3.3 Charakteristika technologických parametrů pulzujícího paprsku .....	21
<b>4 METROLOGIE TOPOGRAFIE POVRCHU.....</b>	<b>22</b>
4.1 Rozdělení inženýrských povrchů.....	22
4.2 Parametry profilu povrchu .....	22
<b>5 ZHODNOCENÍ MĚŘÍCÍCH METOD TOPOGRAFIE POVRCHU .....</b>	<b>25</b>
5.1 Mechanické metody .....	26
5.2 Optické metody.....	26
5.3 Jiné metody .....	27
<b>6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>28</b>
6.1 Příprava zkušebního materiálu.....	28
6.2 Nastavení experimentálního zařízení .....	30
6.3 Vlastní experimentální nastavení .....	32
6.4 Měření vzorků optickým profilometrem MicroProf FRT .....	35
6.5 Analýza dat .....	38
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>49</b>

## SEZNAMY

### Seznam zkratk

AFM	Mikroskopie atomových sil (Atomic Force Microscopy)
AWJ	- abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet)
PWJ	- pulzující vodní paprsek (Pulsating Water Jet)
SEM	- skenovací elektronová mikroskopie (Scanning Electron Microscopes)
STM	- skenovací tunelová mikroskopie (Scanning Tunnelling Microscopy)
ÚGN	Ústav Geoniky AV ČR, v. v. i
WJ	vodní paprsek (Water Jet)



## Seznam symbolů

$A$	- amplituda tlakových pulzací	[ $\mu\text{m}$ ]
$c$	- rychlost šíření rázové vlny	[ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$c_1$	- rychlost šíření rázové vlny v kapalině	[ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$c_2$	- rychlost šíření rázové vlny v pevné látce	[ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$f$	- frekvence ultrazvukového generátoru	[kHz]
$L$	- vzdálenost trysky od povrchu	[mm]
$l_p$	- měřená délka	[mm]
$l$	- délka usměrňovací trubice	[mm]
$p$	- tlak kapaliny	[MPa]
$P$	- výkon ultrazvukového generátoru	[W]
$p_i$	- impaktní tlak kapaliny	[MPa]
$p_s$	- stagnační tlak kapaliny	[MPa]
$p_v$	- tlak kapaliny před tryskou	[MPa]
$Ra$	- střední aritmetická úchylka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$Rq$	- střední kvadratická úchylka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$Rku$	- špičatost posuzovaného profilu	[-]
$Rsk$	- šikmost posuzovaného profilu	[-]
$Rz$	- největší výška nerovnosti profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$v$	- rychlost toku kapaliny při dopadu	[ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
$v_p$	- rychlost posuvu řezné hlavy	[ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
$z_p$	- výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky $l_p$	[ $\mu\text{m}$ ]
$z_v$	- hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky $l_p$	[ $\mu\text{m}$ ]
$\rho_1$	- hustota kapaliny	[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\rho_2$	- hustota pevné látky	[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\emptyset$	- ekvivalentní průměr ploché trysky	[mm]

## ÚVOD

Koncem šedesátých let dvacátého století nastal rozvoj kontinuálních vysokorychlostních vodních paprsků (WJ). Od počátku osmdesátých let se oblast použitelnosti nekonvenční technologie vodního paprsku rozšířila zavedením abrazivních vodních paprsků (AWJ). Technologie WJ a AWJ jsou v současné době používány v mnoha průmyslových aplikacích a vzhledem k univerzálnosti svého použití se často uvádí na prvním místě mezi nekonvenčními metodami obrábění.

Novým směrem, kterým se ubírá výzkum a vývoj kapalinových paprsků, je cesta nižších pracovních tlaků při dosažení srovnatelných výsledků s výsledky získanými vysokotlakými zařízeními. Technologie pulzujícího vodního paprsku (PWJ) patří mezi inovační technologie povrchových úprav materiálů. Účinky této nekonvenční technologie na povrchy různých materiálů jsou v mnoha případech velmi odlišné od klasických technologií. Pulzující kapalinové paprsky využívají impaktního tlaku  $p_i$ , který je několikanásobně vyšší než tlak statický  $p_s$ , čímž způsobuje vyšší erozivní účinky v materiálu. Nástrojem, který je používán při opracování povrchů, je pulzující vodní paprsek. Mezi základní vlastnosti této technologie patří studený a mokrá technologický proces, nízká prašnost, ekologičnost provozu a další. Všechny uvedené vlastnosti provozu technologie pulzujícího vodního paprsku splňují dnešní trendy, které sledují především levné, nenáročné a ekologicky nezatěžující řešení povrchových úprav materiálů.

Předkládaná práce se věnuje studiu topografie povrchu materiálu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem. Zařízení využitě pro experimentální část se nachází na Ústavě Geoniky AV ČR, v. v. i. Zde proběhlo i měření povrchu materiálu vytvořeného technologií PWJ.

# 1 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je studium topografie povrchu materiálu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem za účelem získání analytických informací geometrických parametrů topografie povrchu ve vztahu k vytipovaným technologickým parametrům a vzhledem k platným normovaným parametrům technologické drsnosti povrchu.

K dosažení cíle je potřeba provést:

1. Literární rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Shrnutí a zhodnocení vývoje technologie kapalinového paprsku.
3. Rozbor technologie pulzujícího vodního paprsku.
4. Měření a hodnocení topografie povrchu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem.
5. Analýza a interpretace experimentálně získaných dat.
6. Vyhodnocení vlivu hlavních technologických parametrů pulzujícího vodního paprsku na topografii povrchu.

## 2 HISTORIE KAPALINOVÉHO PAPRSKU

Rozvoj kapalinového paprsku nastal v 19. století společně s rozvojem čerpací techniky. V roce 1853 se pomocí vodních monitorů začala dobývat měkká zlatá ruda v Kalifornii. [20]

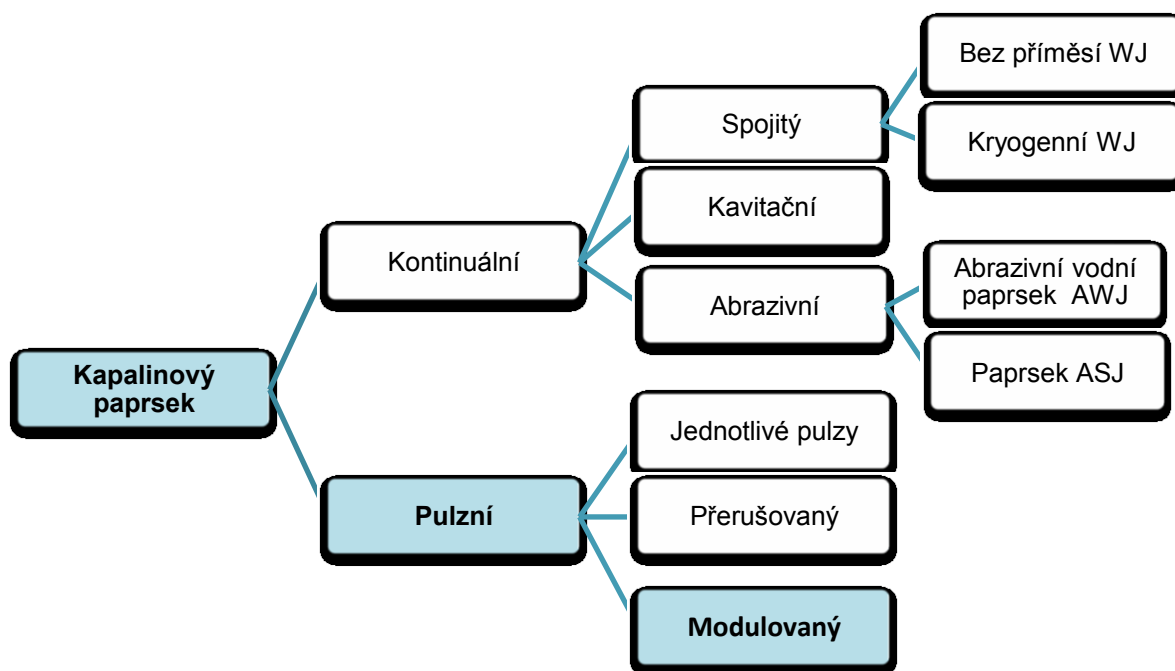
První aplikace kapalinového paprsku byly spojeny nejen s těžbou zlata, ale i při těžbě dalších minerálů (železná ruda ve Virginii, cín v Austrálii). Při prvních pokusech využití vodního paprsku k obrábění nešlo o řezání materiálu, ale spíše o vymílání a odplavování lehčích nánosů.

Využití technologie dezintegrace vodním paprskem se v průmyslu začalo rozvíjet až počátkem 20. století, kdy byly aplikovány první vodní paprsky s nízkým tlakem při dobývání rašelinových ložisek ve středním Prusku a po 1. světové válce byl podobný způsob aplikace vyvinut v Sovětském Svazu. Od roku 1915 byl uplatňován tento způsob i při těžbě uhlí. [7]

V 50. a 60. let zavedl Dr. Norman Franz do technické praxe řezání dřeva vodou (při tlaku asi 200 MPa). Při vývoji prvního vysokotlakého vodního paprsku se nechal Dr. Norman Franz inspirovat metodou, která zjišťovala únik páry z tlakových nádob. Teprve až vývoj přípravku k zajištění kontinuálního proudu vody umožnil rozvoj této technologie. Následovala pak spolupráce s firmou McCartney Manufacturing Company z Baxter Springs v Kansasu, která vedla k výrobě prvního komerčního zařízení na řezání vodním paprskem při tlacích 200 až 400 MPa. V roce 1971 byla instalována první komerční jednotka (s průtokem  $6,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  a tlakem kapaliny 275 MPa) v Alton Box Board Company, která byla využita při řezání lepenkových trubíc pro nábytkářský průmysl. V roce 1979 byl na trh uveden abrazivní vodní paprsek, který byl původně vyvinut za účelem řezání keramických obkladů pro izolaci povrchu raketoplánu NASA. V 90. letech nastal rozvoj pulzujících vodních paprsků. [19], [20].

### 2.1 Rozdělení kapalinových paprsků

Druhy kapalinového paprsku jsou znázorněny na obr. 2.1. Zvýrazněná pole na obrázku představují technologii, kterou byly vytvořeny měřené vzorky. Jednotlivé druhy kapalinového paprsku jsou blíže popsány v literatuře [15], [19], [21]. Technologii kapalinového paprsku lze rozdělit podle dvou kritérií. První kritérium je dáno přetržitostí paprsku v čase na kontinuální a pulzující paprsek. Dále pak lze paprsek rozdělit podle jeho složení, na paprsek čistý nebo abrazivní. [17]



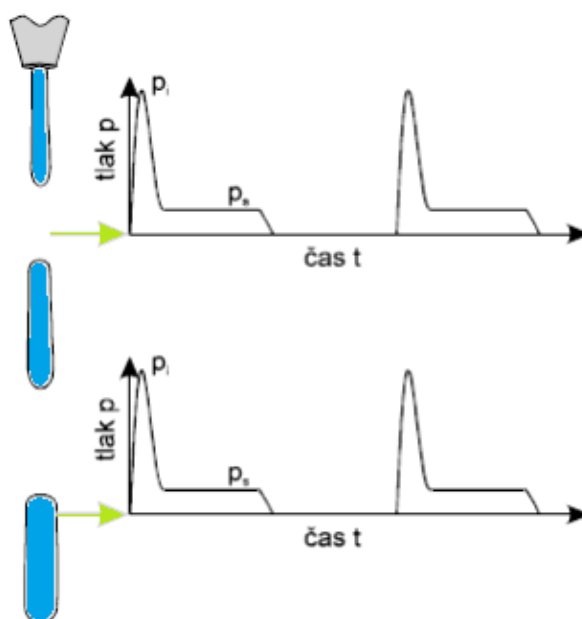
Obrázek 2.1 – Rozdělení kapalinového paprsku.

## 2.2 Klasifikace pulzujících paprsků

Pulzující paprsky jsou charakterizovány proměnnou hladinou energie paprsku při procesu obrábění materiálu. Zavedením přídavné energie do vodního paprsku, nebo využitím principu impaktního tlaku, docílíme zvýšení účinnosti vodního paprsku. V současné době existuje několik způsobů generování pulzujícího paprsku. Je možné je rozdělit do tří základních kategorií: jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí, přerušované paprsky a modulované paprsky.

### 2.2.1 Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí

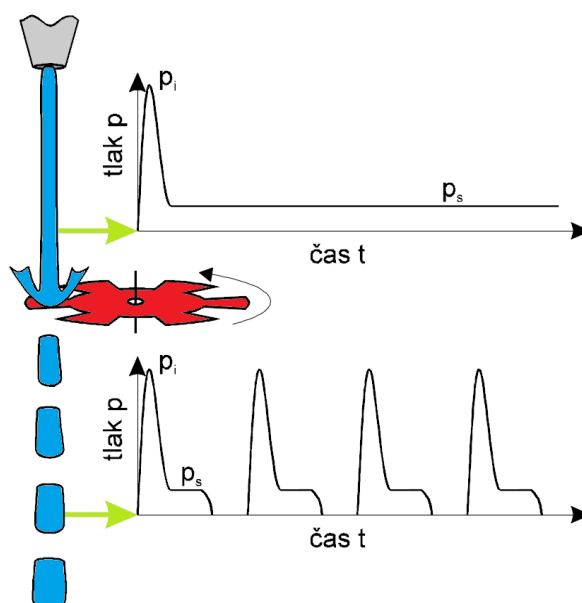
Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí jsou generovány nárazovým zařízením s volným pístem, zařízením vytlačujícím pulzy tlakem, elektrohydraulickým generátorem pulzujících paprsků. Dále může být pulzující paprsek vytvářen pomocí hydraulického generátoru pulzací a to tak, že kapalina je ve vysokotlaké nádobě stlačena na vysoký tlak a otevřením rychlostního ventilu se vytvoří sloupec kapaliny s vysokou kinetickou energií. Pulzující paprsek generovaný jako jednotlivé pulzy je tvořen jednotlivými sloupci vody, které při dopadu na obráběný materiál dosáhnou impaktního tlaku  $p_i$ , který poklesne na tlak stagnační  $p_s$ . Po odeznění dopadu sloupce vody klesá tlak v místě dopadu na nulu. Jednotlivé cykly zatěžování se opakují v závislosti na rychlosti, s jakou jsme schopni generovat pulzy a nezávisí na vzdálenosti od trysky (viz obr. 2.2). [7]



Obrázek 2.2 – Znázornění účinků jednotlivých pulzů nebo pulzů s nízkou frekvencí paprsku na rozpojovaný materiál [7].

### 2.2.2 Přerušované paprsky

Pulzující přerušovaný paprsek se po výstupu z trysky chová jako kontinuální paprsek, ale po průchodu přerušovačem se rozčlení na jednotlivé sloupce vody a začne se chovat jako paprsek pulzující (viz obr. 2.3).



Obrázek 2.3 – Znázornění účinků pulzujícího přerušovaného paprsku na rozpojovaný materiál [7].

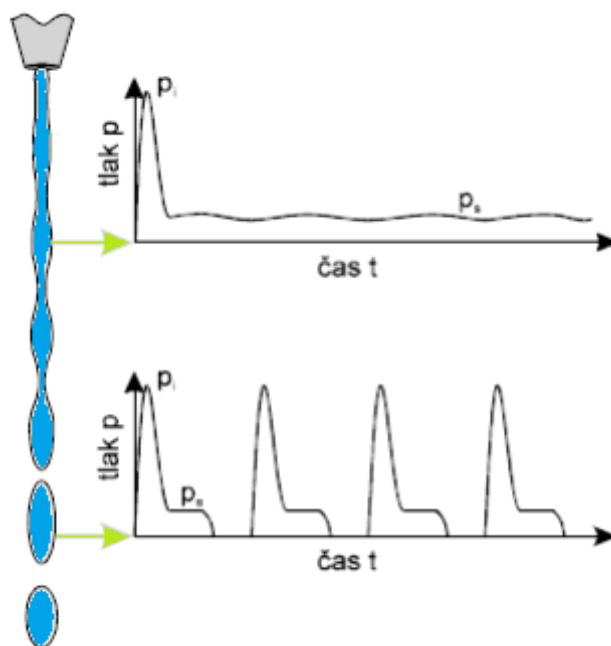
Jako přerušovače se používá rotujícího kotouče s otvory nebo laseru. Nevýhodou tohoto typu pulzujícího paprsku je ztráta části energie vodního paprsku vlivem přerušení a velké opotřebení přerušovače paprsku.

Pulzující přerušovaný paprsek má po výstupu z trysky konstantní hodnotu tlaku. Po průchodu přerušovačem se paprsek rozdělí na jednotlivé sloupce vody, které při dopadu na obráběný materiál mají již impaktní tlak  $p_i$ . Při dopadu se impaktní tlak  $p_i$  mění na stagnační  $p_s$  a po ukončení dopadu sloupce vody je tlak nulový. Tento cyklus se periodicky opakuje s frekvencí odpovídající přerušované paprsku. [7]

### 2.2.3 Modulované paprsky

Modulovaný paprsek vychází z trysky jako kontinuální proud kapaliny s proměnnou axiální rychlostí (cyklicky modulovaný v čase). Rozdílné rychlosti mají za následek, že rychlejší a pomalejší části jednotlivého cyklu mají tendenci se spojovat a vytvářet tak v paprsku shluky kapaliny. Paprsek se stává řadou za sebou jdoucích shluků, které se v určité vzdálenosti od trysky navzájem oddělují.

Modulovaný paprsek netrpí hydraulickým rázem a extrémními změnami reaktivních sil, jako je tomu u systémů generujících jednotlivé pulzace. Navíc nedochází ke ztrátě energie, jako u přerušovaných paprsků, a tím mnohonásobně zvyšuje efektivnost vodního paprsku oproti běžnému kontinuálnímu paprsku. [7]



Obrázek 2.4 – Znázornění účinků pulzujícího modulovaného paprsku na rozpojovaný materiál [7].

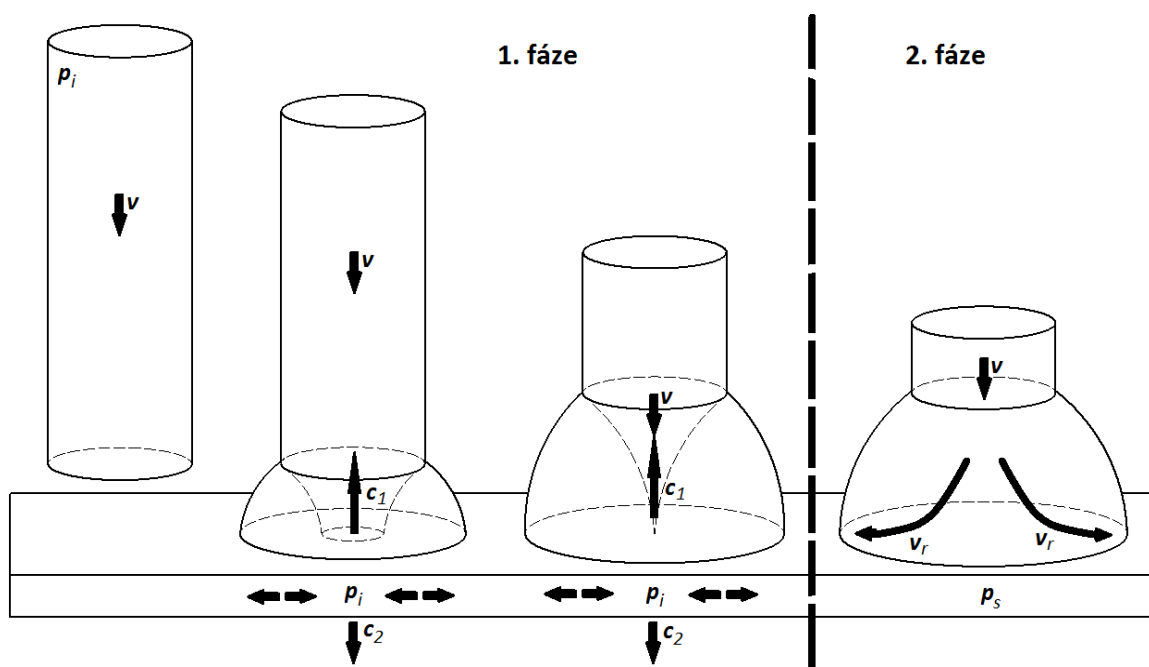
### 3 TECHNOLOGIE PULZUJÍCÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Na Ústavu geoniky AV ČR byl vyvinut a patentován způsob pro generování modulovaného pulzujícího paprsku, který je založen na generování akustických vln působením akustického převodníku na stlačenou kapalinu a jejich přenos přes tlakový systém k trysce [23]. Na tomto zařízení budou probíhat experimenty týkající se mé diplomové práce.

Pokusy o generování pulzujících vodních paprsků (PWJ) probíhají ve světě od počátku sedmdesátých let. Pulzující vodní paprsky jsou vytvářeny systémy využívajícími různé zdroje hnací energie a výstupní charakteristika výsledného pulzujícího paprsku je přímo závislá na způsobu generování paprsku. [7]

#### 3.1 Princip působení pulzujícího vodního parsku

Při dopadu vysokorychlostní kapaliny na pevný povrch vzniká krátkodobý přechodový jev, při kterém v první fázi dochází k výraznému nárůstu tlaku v místě dopadu kapaliny na povrch. V druhé fázi pak dochází ke snížení tlaku a po dopadu sloupce vody je následně tlak nulový. Dopad kapaliny na pevný povrch, který probíhá ve dvou fázích, je zobrazen na obr. 4.1.



Obrázek 4.1 - Dvě fáze dopadu kapaliny na pevný povrch [18].



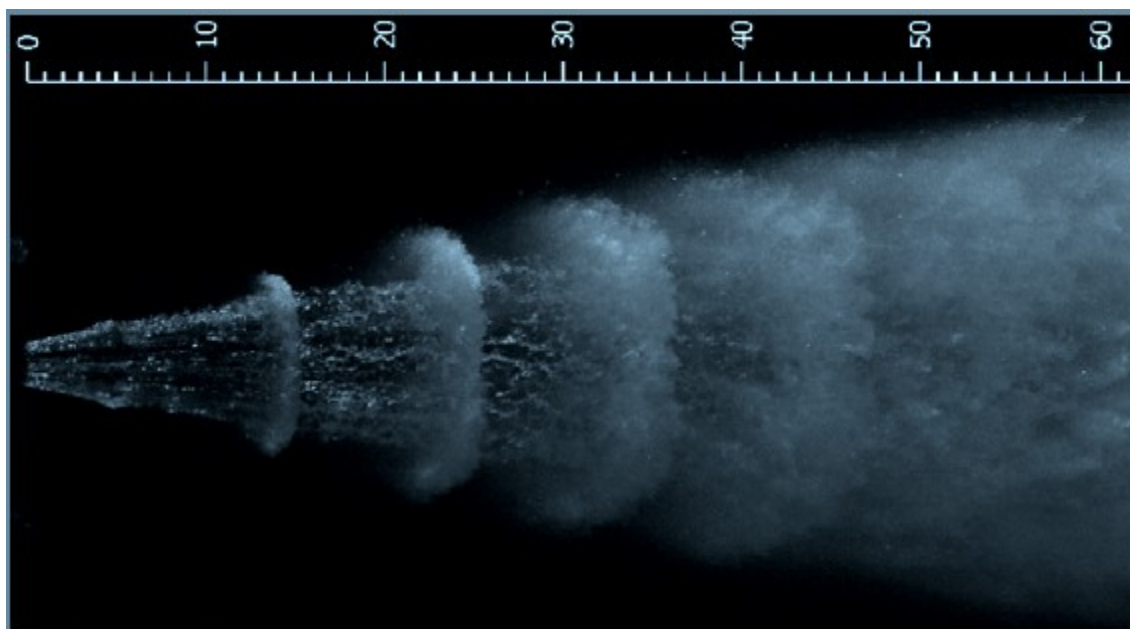
V první fázi, při střetu vysokorychlostní kapaliny s tuhým tělesem, se kapalina chová jako stlačitelná a generuje díky tzv. hydraulickému rázu (water hammer) impaktní tlak  $p_i$  (3.1),

$$p_i = \frac{v\rho_1c_1\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \quad [\text{Pa}] \quad (3.1)$$

kde  $v$  je rychlost dopadu kapaliny,  $\rho_1$  a  $\rho_2$  jsou hustoty a  $c_1$  a  $c_2$  rychlosti šíření rázové vlny v kapalině a pevné látce. Impaktní tlak  $p_i$  je zodpovědný za velkou část poškození způsobeného nárazem kapaliny na pevný povrch [8].

Druhá fáze dopadu kapaliny začíná po odeznění impaktního tlaku. V okamžiku, kdy je překročena mez tlakové deformace kapaliny, kapalina začíná proudit radiálně kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. Začne se chovat jako nestlačitelná a tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší stagnační tlak  $p_s$  (3.2). Ten je dán kinetickou energií objemové jednotky

$$p_s = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad [\text{Pa}] \quad (3.2)$$



Obrázek 4.2 - Pulzující vodní paprsek generovaný tlakem 20MPa (stupnice reprezentuje vzdálenost povrchu od trysky v mm) [11].

Generováním dostatečně velkých tlakových pulzací tlakové kapaliny před výstupem z trysky (tzv. modulací) lze vytvořit pulzující vodní paprsek, který z trysky vystupuje jako kontinuální kapalinový paprsek a do pulzů se formuje až v určité vzdálenosti od výstupu z trysky (obr. 4.2). Výhodou pulzujícího kapalinového paprsku oproti kontinuálnímu paprsku je skutečnost, že při dopadu jednotlivých pulzů se na dopadové ploše cyklicky generuje impaktní tlak, který je několikanásobně vyšší než stagnační tlak generovaný dopadem kontinuálního paprsku za jinak stejných podmínek. Vlivem účinků pulzujícího paprsku navíc dochází k únavovému a smykovému namáhání v materiálu cyklickým zatěžováním dopadové plochy, případně působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To pak dále zvyšuje účinnost pulzujícího kapalinového paprsku v porovnání s kontinuálním paprskem [8], [17].

Autoři popisující vliv působení pulzujícího vodního paprsku na povrch materiálu ve svých publikacích [9], [10], [12], [14], [16], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [33] studují erozivní účinky paprsku a porovnávají s kontinuálními paprsky. Nezabývají se však predikčními modely, které nám umožní popsat, jaké nové vlastnosti bude mít finální povrch. Tyto modely jsou nutné pro efektivní využití a řízení pulzujícího vodního paprsku. Bez toho, abychom znali výsledek požadované technologické operace, je tato technologie obtížně využitelná v průmyslu. Ve snaze lépe pochopit erozivní účinky pulzujícího vodního paprsku, je potřebné sledovat závislosti mezi technologickými parametry a nově vzniklým povrchem obráběného materiálu. Studium topografie povrchu materiálů vytvořených pulzujícím vodním paprskem je důležité pro následné využití této technologie v praxi.

### **3.2 Zařízení pro pulzující vodní paprsek**

Unikátní zařízení pro tvorbu pulzujícího vodního paprsku, které bylo využito k provedení experimentu, se nachází v Ostravě na Ústavu Geoniky AV ČR, v. v. i. Hlavní prvky zařízení pro pulzující vodní paprsek je tvořeno vysokotlakou pumpou, vysokotlakým vedením na rozvod vody, ultrazvukovým generátorem, akustickým generátorem, vodní tryskou a polohovacím zařízením (robotický manipulátor).

#### **3.2.1 Vysokotlaká vodní pumpa**

Na rozdíl od technologie vysokorychlostních vodních paprsků pro řezání, kdy je potřeba tlak 400 MPa, u technologie pulzujícího vodního paprsku stačí tlaky nižší, díky vyšší účinnosti. Použité čerpadlo je plunžrové (obr. 3.3) o maximálním tlaku 150 MPa a maximálním průtoku kapaliny 67 litů za minutu.



Obrázek 3.3 - Vysokotlaké plunžrové čerpadlo [37].

### 3.2.2 Ultrazvukový generátor

Na trhu jsou k dostání ultrazvukové generátory s různými hodnotami výstupních frekvencí a výkonem (obr. 3.4). Ultrazvukem nazýváme akustické vlnění, jehož frekvence leží nad 20 kHz.



Obrázek 3.4 - Ultrazvukový generátor na ÚGN.

### 3.2.3 Akustický generátor

Patentovaný způsob tvorby pulzací [23] použitý v akustickém generátoru je založen na generování akustických vln působením akustického převodníku na stlačenou kapalinu a jejich přenos přes tlakový systém k trysce.

### 3.2.4 Trysky

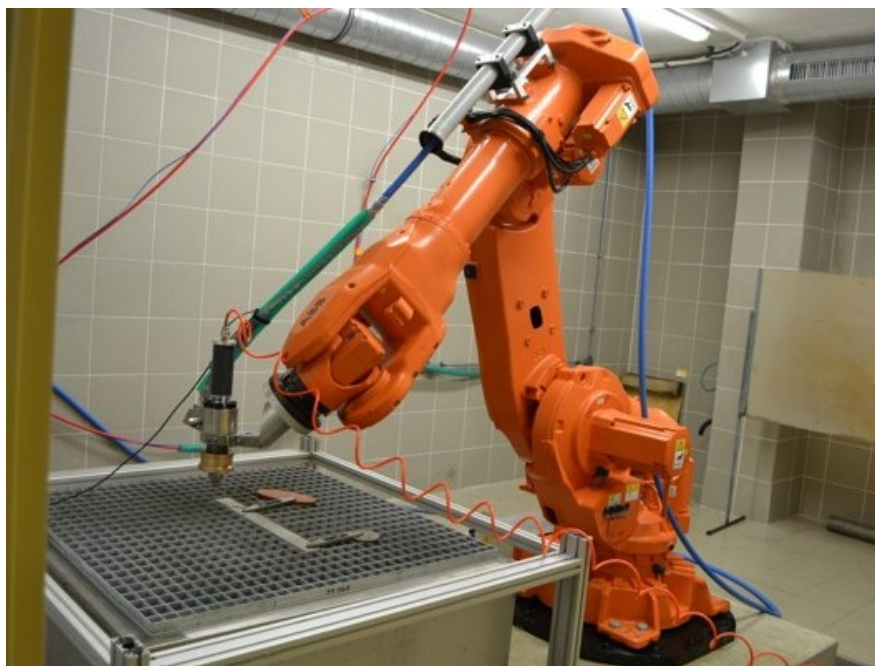
Mezi nejčastěji používané trysky patří rotační, ploché a kruhové trysky (obr. 3.5). V technické praxi se můžeme setkat s různými tvary a velikostmi trysek. Jejich životnost závisí především na konstrukčním materiálu trysky a na pracovním tlaku. Trysky se dále liší tvarem produkovaného paprsku a průtočným množstvím kapaliny. Podle tvaru paprsku nachází jednotlivé typy trysek uplatnění v různých aplikacích. Při experimentálním obrábění materiálu pulzujícím vodním paprskem byla použita plochá tryska.



Obrázek 3.5 - Trysky [38].

### 3.2.5 Polohovací zařízení

Pro přesné polohování a automatizaci procesu se používají manipulátory jako například XY stoly, robotické manipulátory (obr. 3.6), automatizované linky pro speciální aplikace.



Obrázek 3.6 – Robotický manipulátor na ÚGN.

### 3.3 Charakteristika technologických parametrů pulzujícího paprsku

Charakteristiky topografie povrchu obrobené plochy a úběr materiálu ovlivňuje množství technologických faktorů. Hlavní technologické parametry pulzujícího vodního paprsku jsou [17]:

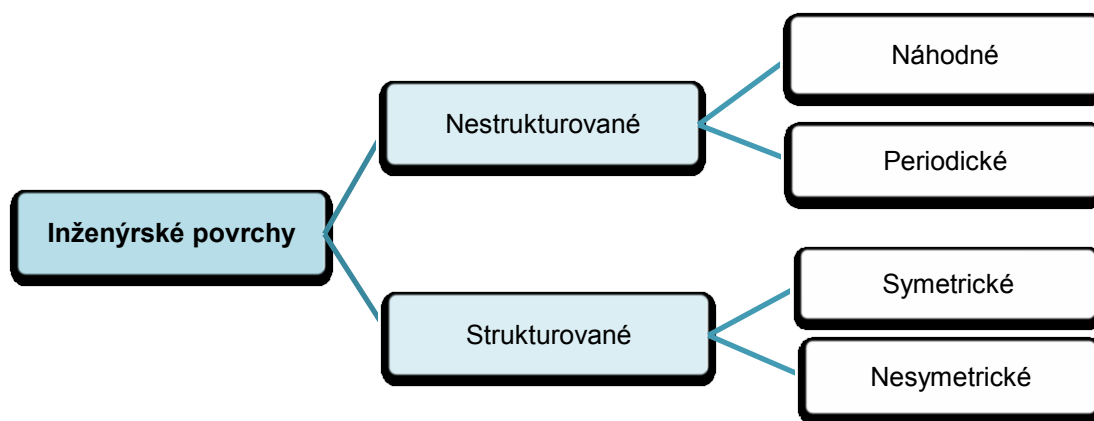
- průtočné množství kapaliny,
- tlak kapaliny,
- posuvná rychlost trysky nad povrchem obráběného materiálu,
- parametry trysek,
- frekvence ultrazvukového generátoru,
- amplituda akustického generátoru,
- úhel působení paprsku na obráběný materiál,
- vzdálenost trysky od povrchu obráběného materiálu,
- fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu obrobku.

## 4 METROLOGIE TOPOGRAFIE POVRCHU

Nerovnost povrchů vytvářených obráběním, ať klasickými či nově rozvíjenými technologiemi (obrábění ultrazvukem, laserem, pulzujícím vodním paprskem) je vlastnost, která je v technické praxi přesně normována. Z výrobně technického hlediska jde o technologickou vlastnost obrobků, která ve značné míře ovlivňuje životnost, spolehlivost součástí, energetické ztráty, odolnost proti opotřebení, ekonomiku strojů a zařízení. [17]

### 4.1 Rozdělení inženýrských povrchů

Povrchy vznikající v důsledku dělení materiálů můžeme rozdělit podle schématu na obr. 4.1. Způsoby dělení materiálu lze rozdělit na konvenční a nekonvenční. Pro obrábění některých nových druhů materiálů jsou konvenční způsoby málo produktivní, nebo se nedají vůbec použít. Konvenční i nekonvenční technologické metody využívané při obrábění zanechávají na povrchu nerovnosti, které mají zásadní význam pro topografii povrchu materiálu. Všechny uvedené inženýrské povrchy náhodné, periodické, symetrické a nesymetrické, vznikají kombinací nastavení různých technologických podmínek dělicího procesu.



Obrázek 4.1 – Klasifikace inženýrských povrchů [2].

### 4.2 Parametry profilu povrchu

Mezi parametry profilu povrchu řadíme parametry drsnosti, které jsou blíže popsány v normě ČSN EN ISO 4287. Mezi normované charakteristiky drsnosti povrchu patří střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , největší výška nerovností profilu  $R_z$ , šikmost posuzovaného profilu  $R_{sk}$ , špičatost posuzovaného profilu  $R_{ku}$ . [5]

Střední aritmetická úchylka profilu  $Ra$  je nejčastěji používaná charakteristika drsnosti povrchu ve strojírenské praxi. Definujeme ji jako přednostní výškový parametr drsnosti povrchu. Jde o střední aritmetickou hodnotu absolutních úchylek profilu od vztažené roviny v rozsahu základní délky.

$$Ra = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad \text{nebo} \quad Ra \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|, \quad (4.1)$$

kde je:  $l_p$  měřená délka [m];

$y(x)$  funkce popisující profil [-];

$y(x_i)$  souřadnice  $n$  bodů profilu povrchu v mezích měřené délky, přičemž  $i = 1, 2, 3, \dots, n \dots$  [-]

Největší výška nerovnosti profilu  $Rz$  lze definovat jako součet výšky  $Zp$  nejvyššího výstupku profilu  $Rp$  a hloubky  $Zv$  nejnižší prohlubně profilu  $Rv$  v rozsahu základní délky.

$$Rz = Zp + Zv \quad (4.2)$$

kde je:  $Zp$  výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky  $l_p$  [ $\mu\text{m}$ ];

$Zv$  hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky  $l_p$  [ $\mu\text{m}$ ].

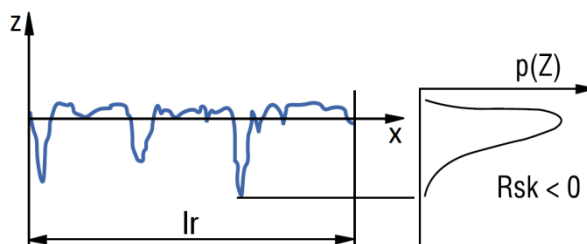
Střední kvadratická úchylka profilu  $Rq$  je definována jako kvadratická analogie parametru  $Ra$  a reflektuje jeho časově-prostorový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti nerovností povrchu. Je definována zápisem [17]

$$Rq = \sqrt{\frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} y^2(x) dx} \quad \text{nebo} \quad Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2(x_i)} \quad (4.3)$$

Šikmost posuzovaného profilu  $Rsk$  je vyjádřena podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky (obr. 4.2).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[ \frac{1}{l_p} \cdot \int_0^{l_p} |Z^3(x)| dx \right] \quad (4.4)$$

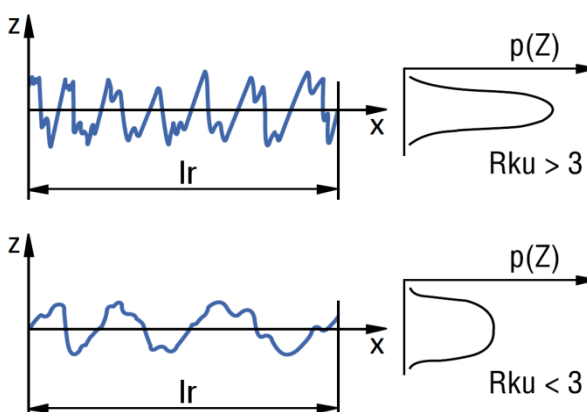
Tato veličina udává posunutí funkce hustoty pravděpodobnosti oproti Gaussovu normálnímu rozložení (obr. 4.2) a umožňuje tak lépe rozlišit povrchy se stejnou hodnotou  $Ra$  z hlediska tvaru profilu. Je-li vrchol této funkce posunut směrem k výstupkům nerovností ( $Rsk < 0$ ), vypovídá to o větších a hlubších prohlubních na povrchu, zatímco je-li vrchol posunut směrem k prohlubním ( $Rsk > 0$ ), ukazuje to na povrch s více a členitějšími výstupky. [39]



Obrázek 4.2 – Šikmost posuzovaného profilu  $Rsk$  [39].

Špičatost posuzovaného profilu  $Rku$  je dána podílem průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic  $Z(x)$  a čtvrté mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky a udává rozšíření nebo zúžení funkce hustoty pravděpodobnosti proti Gaussovu normálnímu rozložení (obr. 4.3).

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[ \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (4.5)$$



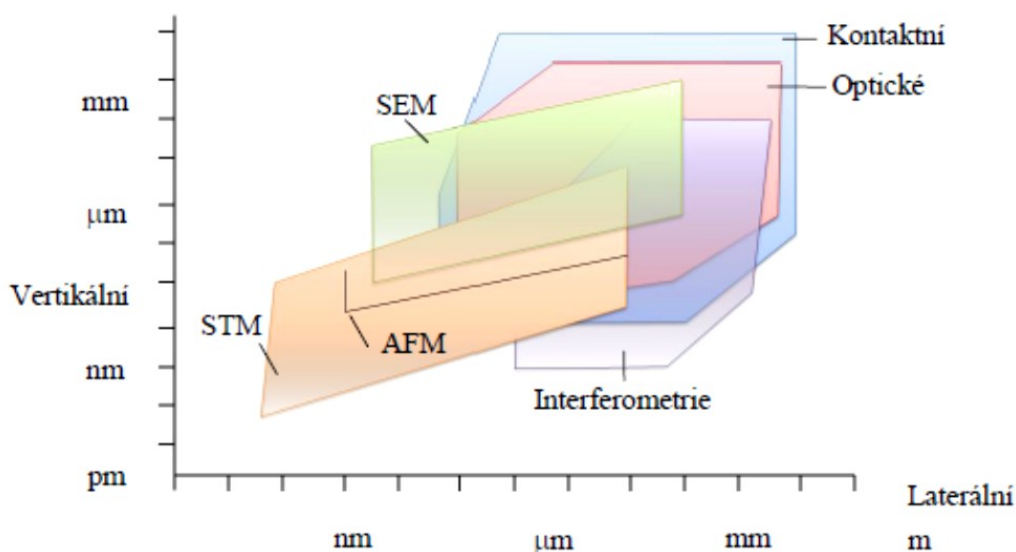
Obrázek 4.3 – Špičatost posuzovaného profilu  $Rku$  [39].



## 5 ZHODNOCENÍ MĚŘÍCÍCH METOD TOPOGRAFIE POVRCHU

Problematicke topografie povrchu se ve strojírenství věnuje řada oborů jako je metrologie, povrchové inženýrství aj. V této souvislosti se stále častěji do podvědomí širší odborné veřejnosti dostává termín povrchová metrologie “Surface metrology” [32]. Povrchová metrologie je vědní disciplína, která se zabývá komplexním studiem povrchových vrstev materiálů z pohledu topografických, mechanických, nebo fyzikálně – chemických vlastností a dějů. [36]

S rozvojem výrobních technologií a postupů rostl i rozvoj měřících metod. V současnosti tyto metody nacházejí své uplatnění nejen ve strojírenském průmyslu, ale i v elektronickém, optoelektronickém, geologickém, stavebním průmyslu. Měřící metody lze rozdělit podle Steadmanova kritéria, které vymezuje schopnost přístroje přijímat odezvy z topografie povrchu. Limitním faktorem je přitom vertikální a laterální rozlišitelnost. Na obrázku 5.1 je porovnání nejrozšířenějších měřících metod podle kritéria rozlišitelnosti [24], [32].

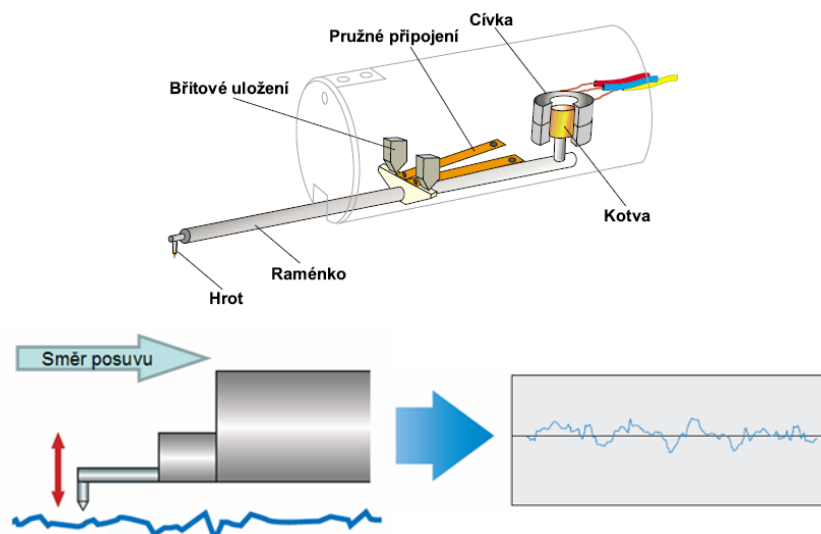


Obrázek 5.1 – Amplitudo-vlnové délkový graf rozlišitelnosti základních měřících metod [36].

Pro účely mé diplomové práce je dostatečně účelné měřící metody rozdělit do tří základních skupin, a to na metody mechanické, optické a jiné.

## 5.1 Mechanické metody

Mechanická neboli kontaktní metoda patří mezi nejvíce rozšířené metody, které se používají ve strojírenství při kontrole jakosti povrchu. Kontaktní profilometr (viz obr. 5. 2) se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanickou část tvoří stolek, na který se připevňuje měřená součást a stojan, po němž se svisle posouvá zařízení s ramenem opatřeným snímačem. Snímač má tvar hrotu. Měřicí hrot se pohybuje po povrchu ve stanoveném rozsahu snímané délky. Nerovnost povrchu způsobuje výchylku hrotu a tvoří mechanický signál, který elektronická část zařízení transformuje na signál elektrický. Po zpracování se signál interpretuje jako číselná hodnota zvoleného parametru textury povrchu, nebo jako grafický záznam.

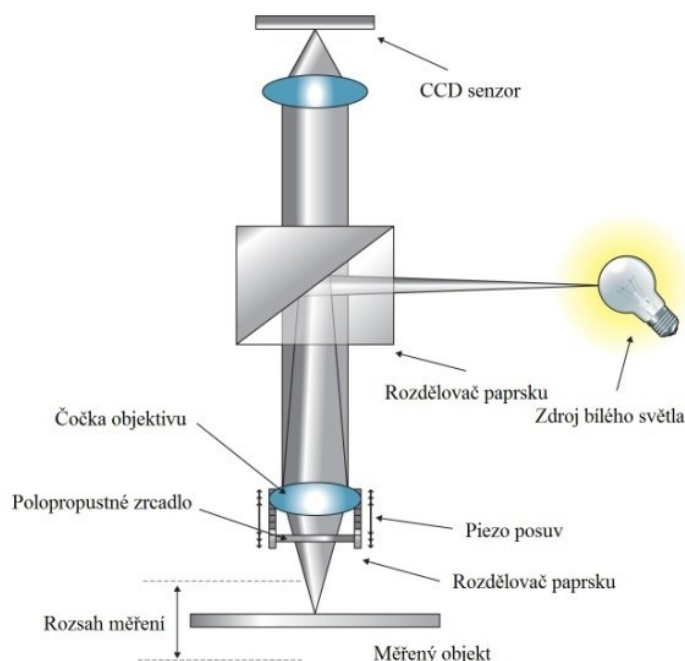


Obrázek 5.2 – Schéma principu kontaktního profilometru [35].

## 5.2 Optické metody

Jde o bezdotykové měření. Používají se k měření menších ploch, v rozsahu od několika mm až po mikronovou oblast. Výhodou je získání plošné 3D informace v krátkém čase. Nedochozí k poškození povrchu, měření lze kdykoliv opakovat.

Optická metoda je založena na principu bílého světla (viz. obr. 5.3), které je ze zdroje přiváděno optickým vláknem ke spojné čočce. Spojná čočka fokusuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Po dopadu na studovaný povrch vzorku je fokusované světlo odraženo zpět do čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku. Tím je získávána informace o výškové nerovnosti povrchu [25], [35].



Obrázek 5.3 – Princip optické metody [1].

### 5.3 Jiné metody

SEM (Scanning electron microscopy) – metoda je založena na analýze proudu elektronů odražených od povrchu vzorku, které dopadají v rovnoběžném směru kolmo na plochu vzorku. Odražené elektrony jsou zachycovány detektorem. Měřený povrch vzorku se umísťuje do pracovní komory, jejíž prostor je vyplněn vakuem. [13]

STM (Scanning tunnelling microscopy) – metoda je přímo založena na pravděpodobnosti průchodu částice energetickou bariérou. Touto metodou není určována přímo topografie povrchu vzorku, ale jen rozložení vlnové funkce atomu. Vlastní měření probíhá tak, že nejprve se provede hrubý posuv vzorku k hrotu ve směru z (hrot je zde tvořen zaostřeným drátkem, např. wolframovým). Poté dojde k přiložení napětí mezi hrot a vzorek. Obraz 3D povrchu je sestavován z řádků rastrování. [3]

AFM (Atomic force microscopy) základ tvoří velmi ostrý hrot, který je upevněn na ohebném nosníku. K detekci však neslouží elektrický proud, ale vzájemná meziatomová přitažlivost mezi povrchem a skenovacím hrotem. Získání obrazu se provádí posuvem ve dvou směrech (x, y) po příslušné matici měřících bodů, zpravidla se pohybuje po řádcích a v jednom směru. [4], [34]

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola se věnuje přípravě vzorků od nastavení vstupních referenčních technologických parametrů pulzujícího vodního paprsku přes dostatečný soubor ověřovacích měření pomocí optické metody s využitím mikroskopu MicroProf FRT. Následně byla provedena experimentální analýza naměřených dat s využitím softwaru SPIP.

### 6.1 Příprava zkušebního materiálu

Materiály použité v experimentální části byly nařezány technologií AWJ a následně byla provedena povrchová úprava konvečními obráběcími technologiemi.

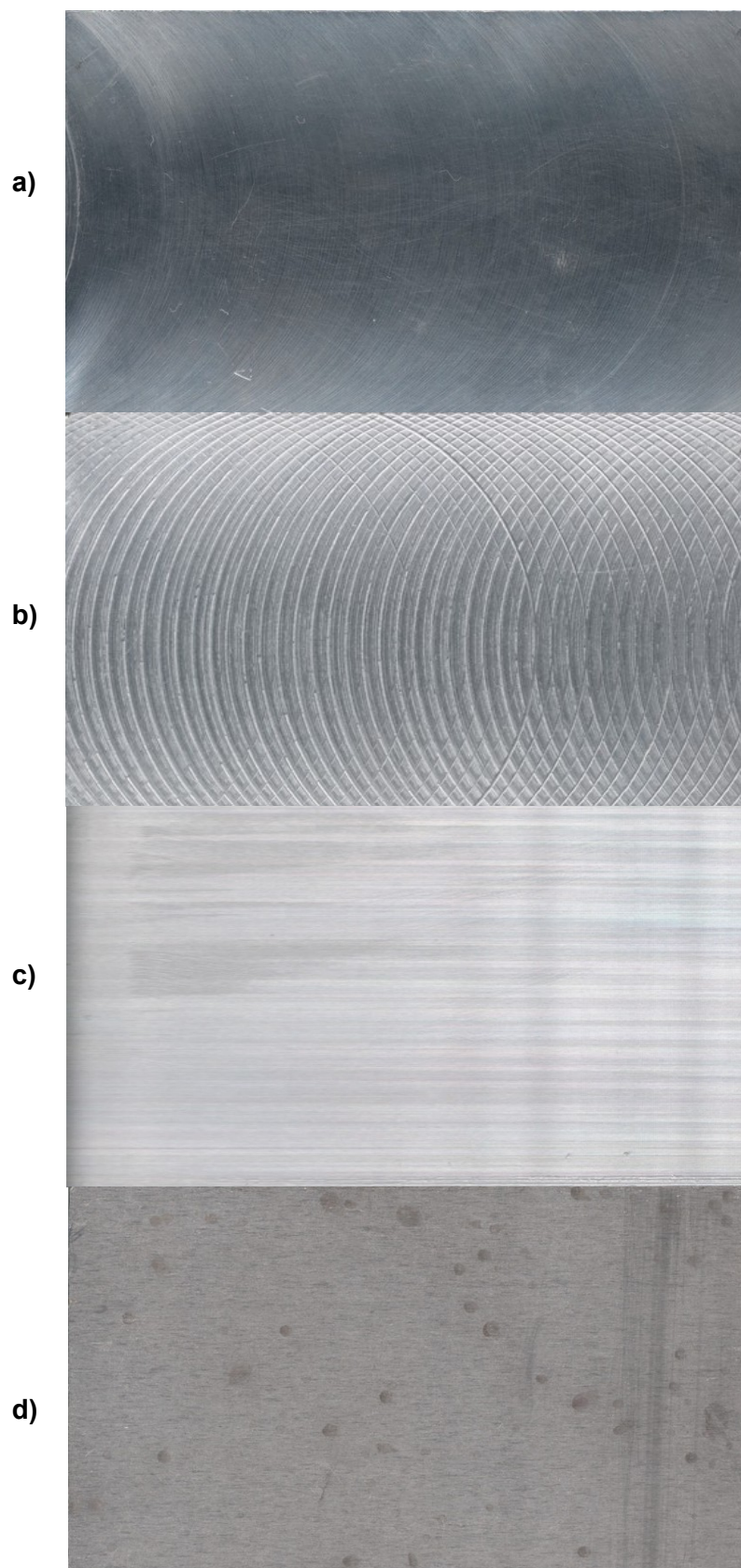
Materiál pro nastavení experimentálního zařízení byl připraven z hliníkového pásu válcovaného za studena vyrobeného z EN AW 1050 (Al99,5) o rozměrech 5x50x500 mm.

Dále byl připraven materiál z 3 mm silného plechu materiálu EN AW 5083 H111 (AlMg4,5Mn0,7), které se nařezali na rozměr 3x50x500 mm.

Další materiál pro přípravu vzorků byl nařezán z 10 mm silného plechu materiálu EN AW 5083 H111 (AlMg4,5Mn0,7) o rozměrech 10x60x100 mm abrazivním vodním paprskem a následně na nich byla provedena povrchová úprava technologiemi hrubého frézování, jemného frézování a hoblování (obr. 6.1). Na jednom vzorku materiálu byla ponechána plocha po válcování z výroby plechu. Parametry těchto technologických operací jsou uvedeny v tab. 6.1. Takto vytvořené povrchy byly poměřeny optickým profilometrem MicroProf FRT pro získání parametrů topografie povrchu před následným opracováním pulzujícím vodním paprskem.

Tabulka 6.1 – Technologické parametry povrchových úprav.

Povrchová úprava	Technologické parametry
Hrubé frézování	Fréza $\varnothing$ 63 mm 12 břitů, $360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Jemné frézování	Fréza $\varnothing$ 63 mm, 12 břitů, $1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $470 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Hoblování	Hoblovka $52 \text{ zd} \cdot \text{min}^{-1}$ , přísuv 0,12 na zdvih
Válcování	Ponechány výrobní parametry

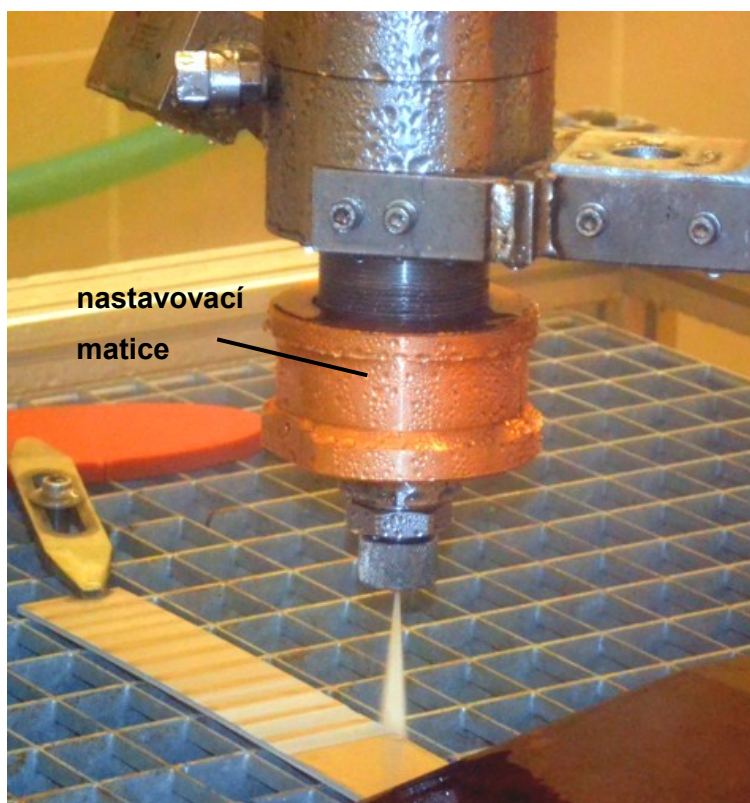


Obrázek 6.1 – Materiál EN AW 5083 upravený technologiemi a) jemné frézování, b) hrubé frézování, c) hoblování, d) válcování.



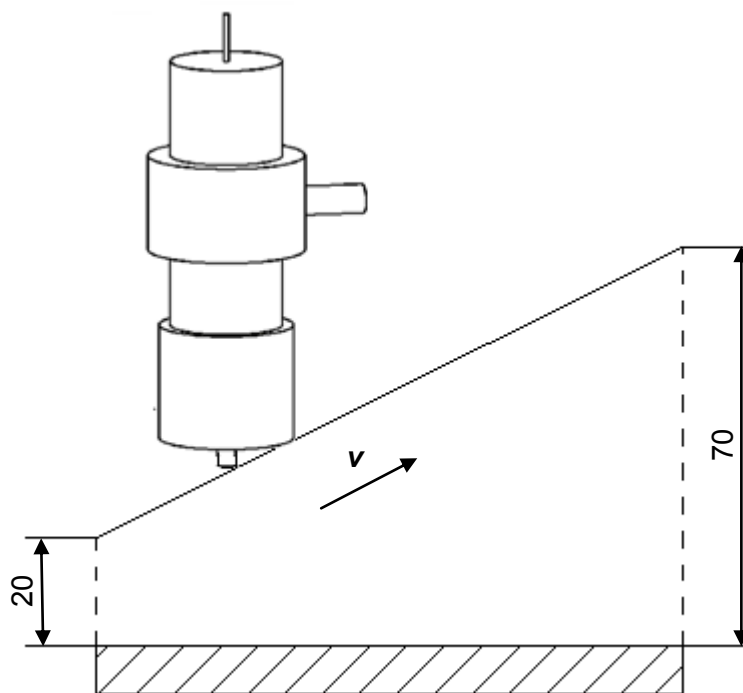
## 6.2 Nastavení experimentálního zařízení

Na materiálu EN AW 1050 (Al99,5) o rozměrech 5x50x500 mm byly provedeny zkoušky dezintegračních účinků pulzujícího vodního paprsku. Hledalo se správné nastavení geometrie vnitřního uspořádání akustické komory, aby paprsek na výstupu měl co největší desintegrační účinek. Nastavení geometrie se provádí otáčením nastavovací matice na hlavě akustického generátoru (obr. 6.2).



Obrázek 6.2 – Nastavovací matice na zařízení PWJ.

Pomocí upínek se upnul hliníkový vzorek na rošt pracovního stolu. Nastavení geometrie akustické komory začalo na plně zašroubované matici a postupovalo vždy o jednu otáčku (tj. 2 mm podle stoupání závitu) a provedl se desintegrační účinek. Pohyb trysky zajišťovalo robotické rameno s přesně naprogramovanou trajektorií. Rychlost posuvu trysky nad povrchem materiálu byla  $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Trajektorie pohybu trysky je znázorněna na obrázku 6.3. Vzdálenost trysky od povrchu materiálu byla nejprve 20 mm a pokračovalo se následně do výšky 70 mm. Jelikož se desintegrační účinek paprsku projevuje až v určité vzdálenosti od trysky (viz kapitola 3), začal paprsek erodovat materiál v určitém místě přejezdu nad vzorkem. Takto se postupovalo pro všechna nastavení nastavovací matice.



Obrázek 6.3 – Schematické znázornění trajektorie trysky.

Po vytvoření všech erozivních zkoušek se vybralo nastavení matice, které způsobovalo největší erozivní účinek (obr. 6.4). Následně se určila optimální vzdálenost trysky nad povrchem na 55 mm. Při tomto nastavení byla budící frekvence ultrazvukového generátoru ustálena na hodnotě 20,09 kHz a výkon generátoru na hodnoty od 230 W do 260 W. Technologické parametry použité při hledání optimálního nastavení zařízení pulzujícího vodního paprsku jsou uvedeny v tabulce 6.2.



Obrázek 6.4 – Desintegrační účinek paprsku při různém nastavení geometrie akustické komory.

Tabulka 6.2 – Technologické parametry použité při hledání optimálního experimentálního nastavení zařízení.

Parametry	Hodnoty
Tlak kapaliny $p$ [MPa]	20
Tryska plochá – ekvivalentní průměr $\varnothing$ [mm]	2
Tryska plochá – úhel rozstříku $[\circ]$	10
Úhel dopadu paprsku na povrch vzorku $[\circ]$	90
Vzdálenost trysky od povrchu $L$ [mm]	20 až 70
Vzdálenost nastavovací matice [mm]	13
Frekvence ultrazvukového generátoru $f$ [kHz]	20,09
Výkon ultrazvukového generátoru $P$ [W]	230 až 260
Amplituda akustického generátoru $A$ [ $\mu\text{m}$ ]	7 (100 %)
Rychlost posuvu nástroje nad povrchem $v_p$ [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	5
Počet přejezdů nad povrchem	1
Materiál	EN AW 1050

### 6.3 Vlastní experimentální nastavení

Hlavní experiment, při kterém se sledoval vliv posuvové rychlosti na topografii povrchu materiálu, probíhal s obdobným nastavením technologických parametrů. Změnila se vzdálenost trysky od povrchu materiálu na 55 mm. Tato vzdálenost byla po celou dobu přejezdu neměnná. Měnila se pouze rychlost posuvu trysky od  $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Materiál pro hlavní experiment byl zvolen EN AW 5083. Na tomto materiálu o rozměrech  $3\times 50\times 500 \text{ mm}$  se vytvořilo 23 drážek pulzujícím vodním paprskem. Následně byla vytvořena ještě jedna drážka č. 24 rychlostí  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . U této drážky nebyly použity pulzace z důvodu následného porovnání účinnosti PWJ oproti kontinuálnímu paprsku. Nastavení parametrů experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Druhá část hlavního experimentu spočívala ve sledování závislosti počtu přejezdů na výslednou topografii povrchu. Nastavení experimentu se tedy lišilo pouze v počtu přejezdů nad povrchem materiálu od 2 do 8. Na materiálu EN AW 5083 o rozměrech  $3\times 50\times 500 \text{ mm}$  bylo vytvořeno 25 drážek pulzujícím vodním paprskem. Zhotovení vzorků technologií PWJ je vidět na obrázku 6.5.

Třetí část experimentu měla za cíl použít technologii PWJ na různě obrobené povrchy materiálu EN AW 5083 a zjistit tak vliv topografie povrchu před aplikací PWJ na topografii povrchu po aplikaci PWJ. Technologické parametry (tab. 6.3) byly opět zvoleny



stejně jako u předchozích experimentů a rychlost posuvu nastavena na hodnoty od  $0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  do  $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na každém vzorkovém tělese bylo vytvořeno 5 drážek (obr. 6.6).



Obrázek 6.5 – Zhotovení vzorků technologií PWJ.

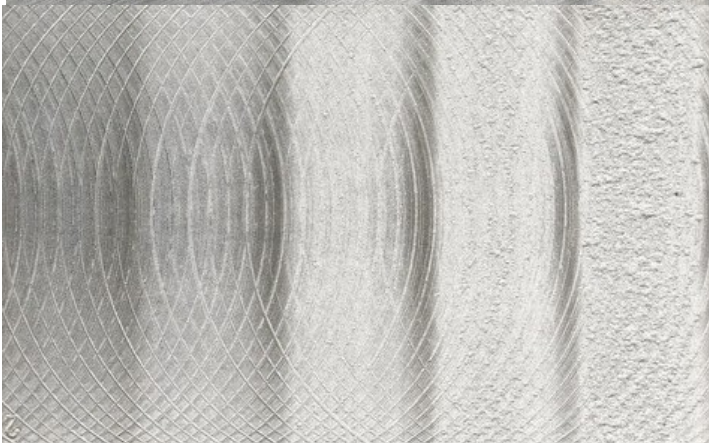
Tabulka 6.3 – Experimentální nastavení parametrů.

Parametry	Hodnoty
Tlak kapaliny $p$ [MPa]	20
Tryska plochá – ekvivalentní průměr $\varnothing$ [mm]	2
Tryska plochá – úhel rozstříku [°]	10
Úhel dopadu paprsku na povrch vzorku [°]	90
Vzdálenost trysky od povrchu $L$ [mm]	55
Vzdálenost nastavovací matice [mm]	13
Frekvence ultrazvukového generátoru $f$ [kHz]	20,09
Výkon ultrazvukového generátoru $P$ [W]	230 až 260
Amplituda akustického generátoru $A$ [ $\mu\text{m}$ ]	7 (100 %)
Rychlost posuvu nástroje nad povrchem $v_p$ [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0,5 až 10
Počet přejezdů nad povrchem	1 až 8
Materiál	EN AW 5083 H111
Povrchy vzorků před aplikací PWJ	Válcovaný, frézovaný hrubě, frézovaný jemně, hoblovaný.

a)



b)



c)



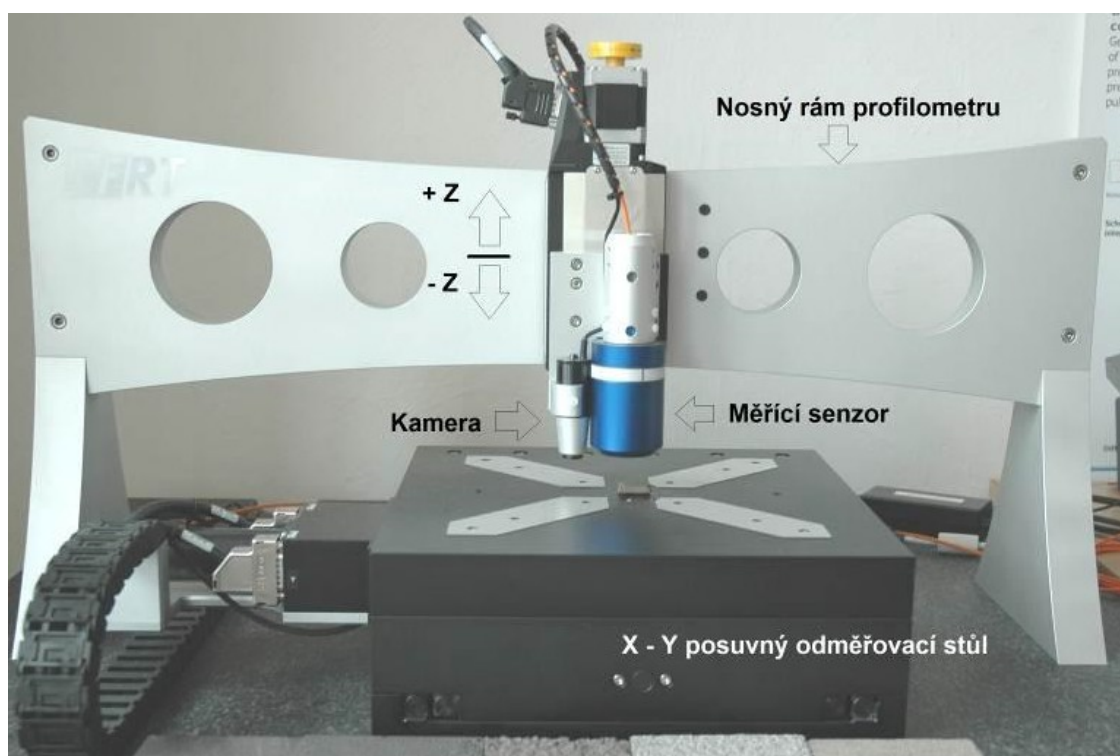
d)



Obrázek 6.6 – Drážky vytvořené pomocí PWJ na materiálu EN AW 5083 upraveném technologiemi a) jemné frézování, b) hrubé frézování, c) hoblování, d) válcování.

## 6.4 Měření vzorků optickým profilometrem MicroProf FRT

Měření topografie povrchu vzorků vytvořených pulzujícím vodním paprskem bylo provedeno na optickém profilometru MicroProf FRT (obr. 6.7). Technické specifikace optického profilometru a nastavení parametrů, které byly použity při měření vzorků, jsou uvedeny v tabulce 6.4. Princip optického profilometru s chromatickou aberací čočky byl blíže popsán v kapitole 5.2.



Obrázek 6.7 – Optický profilometr MicroProf FRT [36]

Měřicí zařízení optického profilometru MicroProf FRT se skládá z X-Y posuvného odměřovacího stolu, měřicího senzoru, optické kamery a nosného rámu. Vzorek byl umístěn na pohyblivém skenovacím stolku pod nepohybujícím se senzorem. Měření povrchu vzorku probíhalo během posuvného pohybu X-Y odměřovacího stolu s předem definovanou rychlostí. Při měření byly získány údaje o textuře studovaného povrchu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem. 3D snímky zkoumaných vzorků byly sestavovány z jednotlivých bodů při rastrování topografie povrchu a zaznamenávání délkových a výškových pozic. Výslednou kvalitu měření ovlivňuje pak hustota vytvořené bodové sítě nad vztažnou rovinou a chyby měření, které jsou způsobeny vnějšími vlivy během samotného měření. Vzdálenost mezi jednotlivými měřícími body lze u zařízení MicroProf FRT nastavit na pouhých  $0,6\ \mu\text{m}$ . Při takto detailním měření povrchu bychom získali komplexnější a přesnější informace, jelikož zde platí obecné pravidlo, čím více, tím

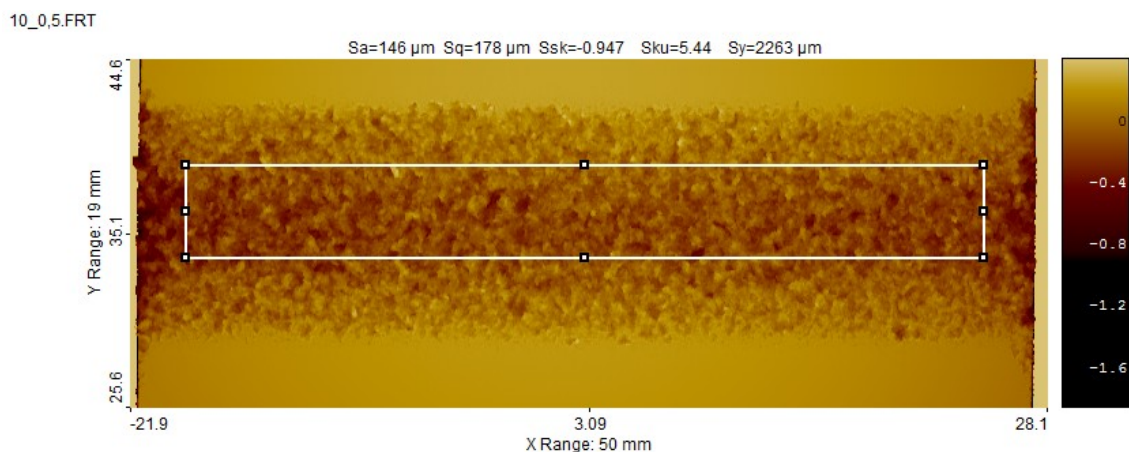
lépe, avšak samotné měření jednoho vzorku by trvalo více jak 20 hodin. Nastavení parametrů při měření vzorků bylo zvoleno s ohledem na časovou náročnost (bylo vytvořeno 68 vzorků) a získání dostatečného množství informací o struktuře povrchu.

Tabulka 6.4 – Parametry optického profilometru MicroProf FRT

<b>Charakteristika optického profilometru MicroProf FRT</b>	
Osa x [mm]	200
Osa y [mm]	200
Osa z [mm]	50
Maximální měřicí rychlost [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	100
Minimální měřicí rychlost [ $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1
Rozlišení nastavení os měřicího přístroje x, y, z [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0,001
Přesnost nastavení polohy [mm]	$\pm 0,001$
Minimální vzdálenost mezi měřicími body $\Delta X, \Delta Y$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,6
Maximální rozměr měřeného vzorku [ $\text{mm}^3$ ]	310x310x50
Maximální hmotnost vzorku [kg]	5
Hmotnost přístroje [kg]	520
Doporučená pracovní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$20 \pm 2$
Maximální dovolená změna teploty v laboratoři [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	0,5
<b>Charakteristika měřicí hlavy a senzoru SEN 000 03</b>	
Spektrální rozsah osa z [mm]	3
Pracovní vzdálenost [mm]	22,5
Vertikální rozlišení [nm]	100/30
Přesnost [ $\mu\text{m}$ ]	1
Velikost bodu paprsku [ $\mu\text{m}$ ]	12
Laterální rozlišení [ $\mu\text{m}$ ]	6
<b>Nastavení parametrů při měření experimentálních vzorků</b>	
Rozměr skenované plochy x [mm]	40
Rozměr skenované plochy y [mm]	5
Počet skenovaných bodů v jedné linii (x)	10000
Počet skenovaných linií (y)	20

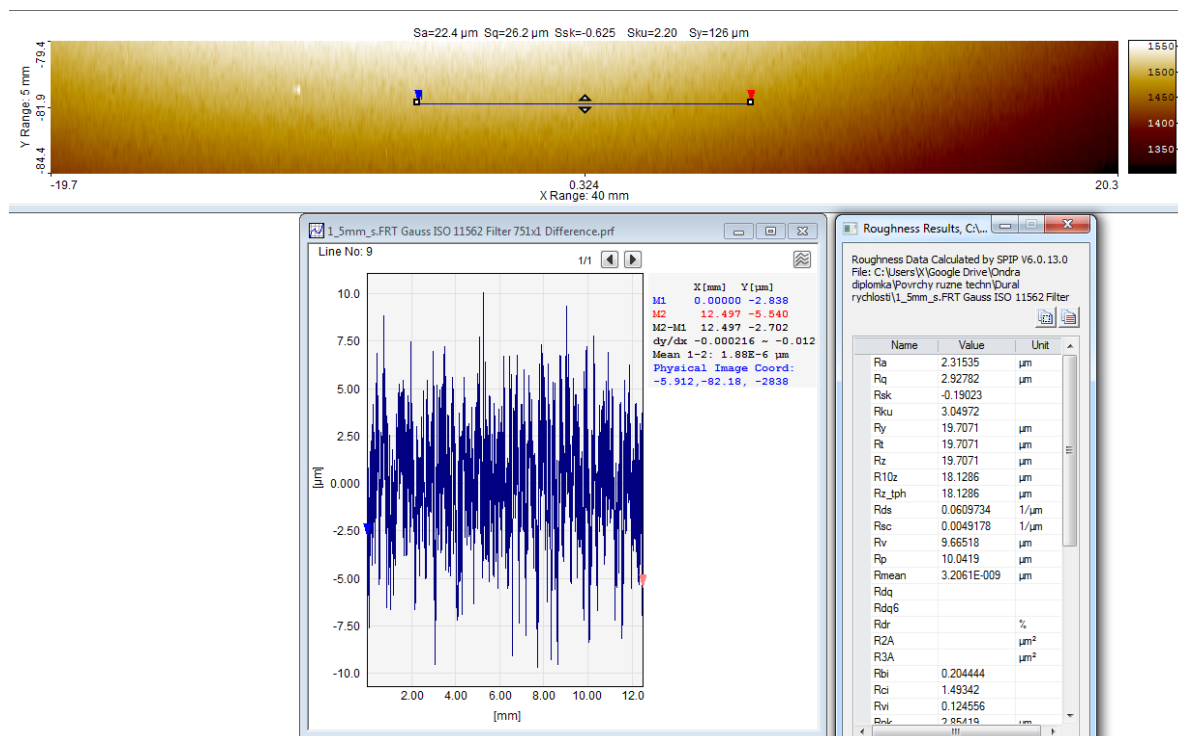
Z každé vytvořené drážky byla vybrána oblast o rozměrech 40x5 mm, viz obr. 6.8. Na této ploše bylo provedeno skenování ve 20-ti skenovacích liniích s rozlišením 10000 bodů v jedné skenovací linii.





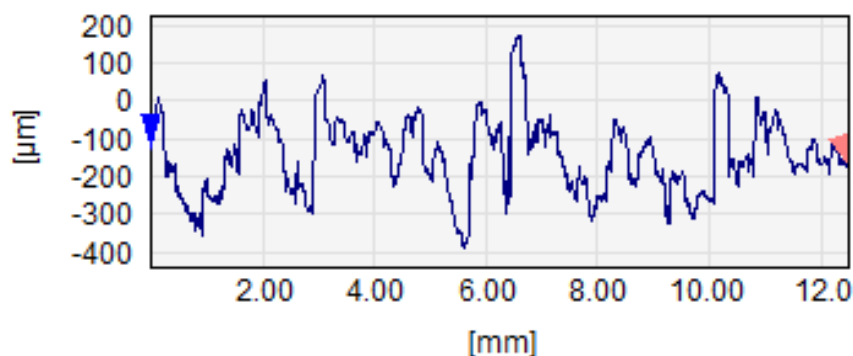
Obrázek 6.8 – Měřená oblast.

Zpracování získaných dat bylo provedeno pomocí softwaru SPIP, který umožnil rozsáhlou analýzu těchto dat. Pracovní prostředí programu SPIP je zobrazeno na obr. 6.9.



Obrázek 6.9 – Pracovní prostředí programu SPIP.

Z každé měřicí linie byly získány signály, viz obr. 6.10, ze kterých byly stanoveny 2D parametry povrchu (střední aritmetická úchylna profilu  $R_a$ , největší výška nerovností profilu  $R_z$ , šikmost posuzovaného profilu  $R_{sk}$ , špičatost posuzovaného profilu  $R_{ku}$ ).



Obrázek 6.10 – Profil povrchu zkoumaného vzorku.

## 6.5 Analýza dat

Byly zkoumány vlastnosti nově vytvořeného povrchu vzorku materiálu EN AW 5083 pomocí technologie PWJ. Vzorky byly vystaveny účinkům pulzujícího paprsku generovaného různými pracovními parametry, které jsou uvedeny v tabulce 6.3. Efekty dopadu kapaliny na povrch byly studovány metodou optické mikroskopie s využitím zařízení MicroProf FRT. Nově vzniklá vrstva materiálu vytvořená pulzujícím vodním parskem má náhodnou strukturu povrchu. Pro porovnávání získaných povrchů byly vybrány následující parametry topografie povrchu:

- střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ ,
- největší výška nerovností profilu  $R_z$ ,
- šikmost posuzovaného profilu  $R_{sk}$ ,
- špičatost posuzovaného profilu  $R_{ku}$ .

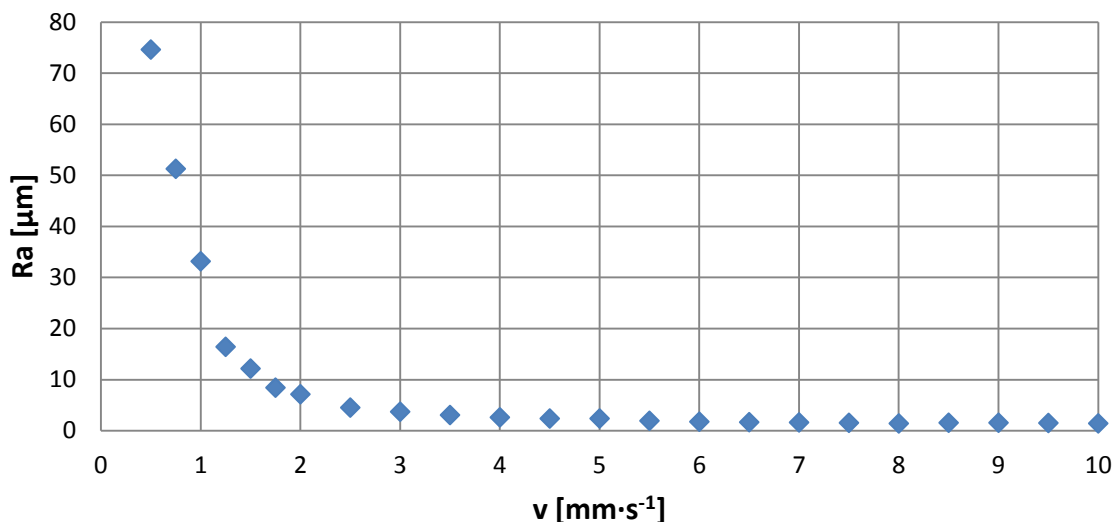
Na vzorku materiálu EN AW 5083 o rozměrech 5x50x500 bylo vytvořeno celkem 24 drážek. Z toho 23 drážek bylo vytvořeno pulzujícím vodním parskem a jedna drážka kontinuálním vodním parskem, pro porovnání desintegračních účinků těchto technologií. V tabulce 6.6 jsou uvedeny hodnoty parametrů  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  ve vztahu k rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$  pro vzorky vytvořené technologií PWJ. Porovnání vlivu působení technologie PWJ a WJ na výslednou strukturu povrchu je graficky znázorněno na obr. 6.15.

Tabulka 6.5 – Hodnoty parametrů  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rsk$ ,  $Rku$  povrchu po aplikaci PWJ.

č. drážky	$v_p$ [mm·s <sup>-1</sup> ]	$Ra$ [μm]	$Rz$ [μm]	$Rsk$ [-]	$Rku$ [-]
1	0,5	74,63	576,67	-0,01	2,91
2	0,75	51,29	403,69	-0,17	2,87
3	1	33,19	346,98	-0,59	4,03
4	1,25	16,45	185,36	-0,65	4,63
5	1,5	12,19	163,43	-0,67	4,92
6	1,75	8,45	104,68	-0,60	5,10
7	2	7,16	81,48	-0,63	4,42
8	2,5	4,55	42,97	-0,71	4,63
9	3	3,74	46,66	-0,93	5,68
10	3,5	3,09	33,57	-0,77	4,75
11	4	2,64	30,47	-0,39	3,78
12	4,5	2,41	23,54	-0,51	3,82
13	5	2,41	28,29	-0,42	4,28
14	5,5	1,96	19,58	-0,56	4,93
15	6	1,79	14,79	-0,16	3,22
16	6,5	1,69	15,20	-0,27	3,45
17	7	1,65	13,86	-0,07	3,13
18	7,5	1,57	13,39	0,02	3,24
19	8	1,45	12,96	-0,18	3,47
20	8,5	1,59	13,12	0,02	3,01
21	9	1,58	13,76	-0,18	3,25
22	9,5	1,54	13,79	-0,05	3,12
23	10	1,46	14,62	-0,20	3,19

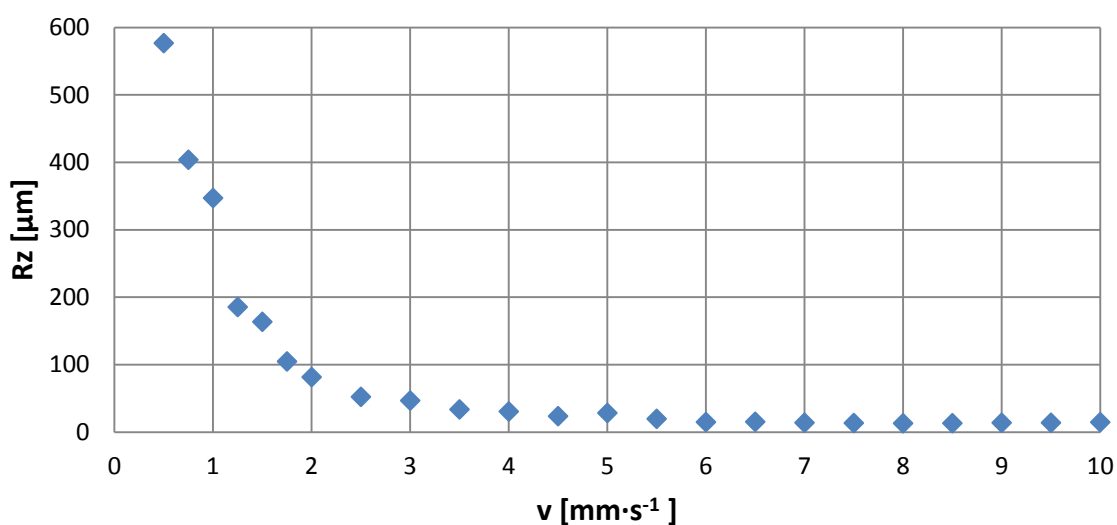
Při rychlostech posuvu  $v_p = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  byl povrch materiálu ovlivněn nejméně. Naopak při nejnižších rychlostech posuvu  $v_p = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  byl povrch materiálu již silně erodován a pozorován velký objemový úběr materiálu z povrchu vzorku.

Na obr. 6.11, 6.12, 6.13, 6.14 jsou vykresleny grafy pro výškové parametry drsnosti (dle normy ČSN EN ISO 4287)  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rsk$ ,  $Rku$  ve vztahu k rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$ . Se snižující se rychlostí posuvu  $v_p$  je desintegrační účinek pulzujícího vodního paprsku rostoucí.



Obrázek 6.11 – Závislost střední aritmetické úchylky  $R_a$  na rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$ .

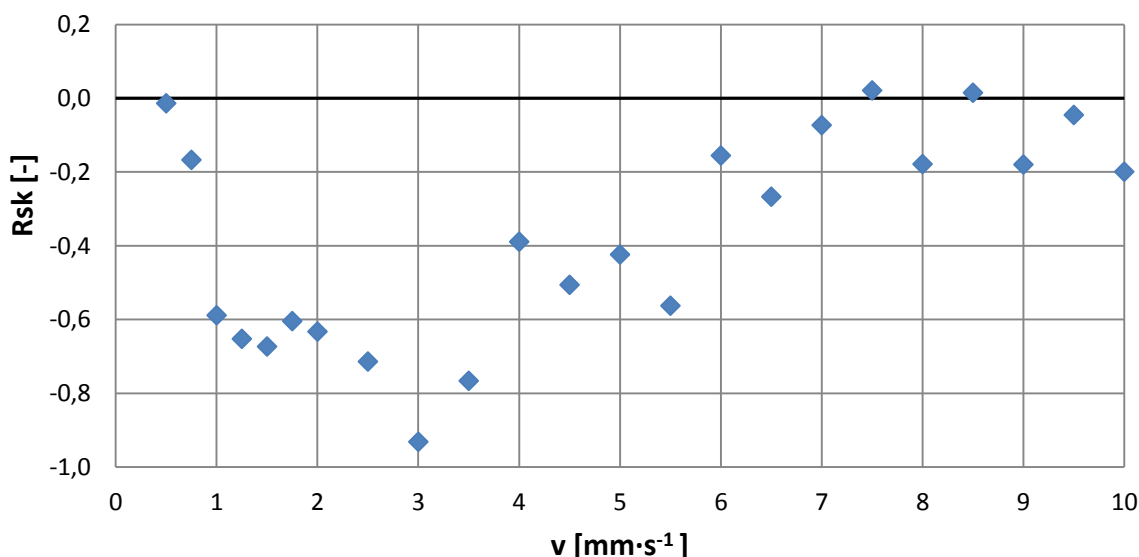
Na obrázku 6.11 lze vidět, že při snižující se rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$  pozvolna narůstá střední aritmetická úchylka  $R_a = 1,5 \mu\text{m}$  ( $v_p = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) až na hodnotu  $4,5 \mu\text{m}$  ( $v_p = 2,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Při dalším zpomalování rychlosti posuvu, kdy  $v_p < 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , dochází k prudkému růstu střední aritmetické úchylky až na hodnoty kolem  $R_a = 75 \mu\text{m}$ . Podobný průběh závislosti na rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$  má i největší výška nerovností profilu  $R_z$ , viz obr. 6.12. Vysoké hodnoty parametrů drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  při nízké rychlosti posuvu  $v_p$  jsou způsobené velkým objemovým úběrem materiálu.



Obrázek 6.12 – Závislost největší výška nerovností profilu  $R_z$  na rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$ .



Další důležitý parametr, který vypovídá o charakteru topografie povrchu je šikmost posuzovaného profilu  $Rsk$ . Na obrázku 6.13 vidíme závislost parametru  $Rsk$  na rychlosti posuvu  $v_p$ . Tento parametr nám umožňuje rozlišit povrchy z hlediska tvaru profilu. Dva povrchy se stejnou hodnotou  $Ra$  mohou mít zcela rozdílný povrch. Hodnota parametru  $Rsk > 0$  odpovídá povrchu s více členitějšími výstupky. Je-li  $Rsk < 0$ , profil ukazuje na členitější a větší prohlubně, viz obr. 4.2.



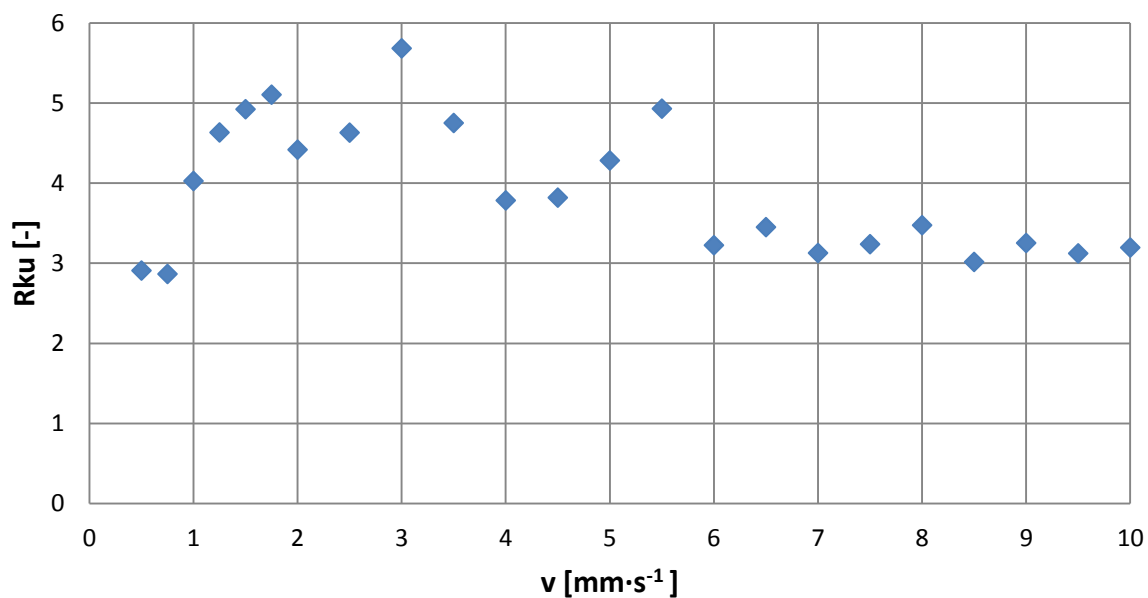
Obrázek 6.13 – Závislost šikmosti posuzovaného profilu  $Rsk$  na rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$ .

U rychlosti posuvu  $v_p < 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  jsou hodnoty  $Rsk$  v rozmezí od 0 do -0,2. Při rychlostech  $v_p > 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  až do  $4,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  dosahuje parametr  $Rsk$  hodnot od -0,4 do -1, což vypovídá o povrchu, který je tvořen členitějšími a většími prohlubněmi. Takovýto povrch se vyznačuje jako povrch s málo výstupky, který se tak rychle neopotřebí, tudíž by mohl být vhodný jako nosná plocha.

Na obr. 6.14 vidíme graf závislosti špičatosti posuzovaného profilu  $Rku$  na rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$ . Tento parametr nám ukazuje jak je povrch členitý. Pokud je parametr  $Rku > 3$ , jedná se o povrch více členitý s mnoha prudkými změnami profilu. Naproti tomu hodnoty  $Rku < 3$  ukazují na povrch více vyhlazený, viz obr. 4.3.

Desintegrační účinek paprsku s rostoucí rychlostí posuvu  $v_p$  klesá, viz obr. 6.11 a 6.12. Avšak textura povrchu má vždy stejný charakter. Struktura povrchu odpovídá naměřeným hodnotám parametru  $Rku > 3$ . Povrch materiálu po aplikaci technologie pulzujícího vodního paprsku je velmi členitý, čemuž odpovídají i naměřené hodnoty.

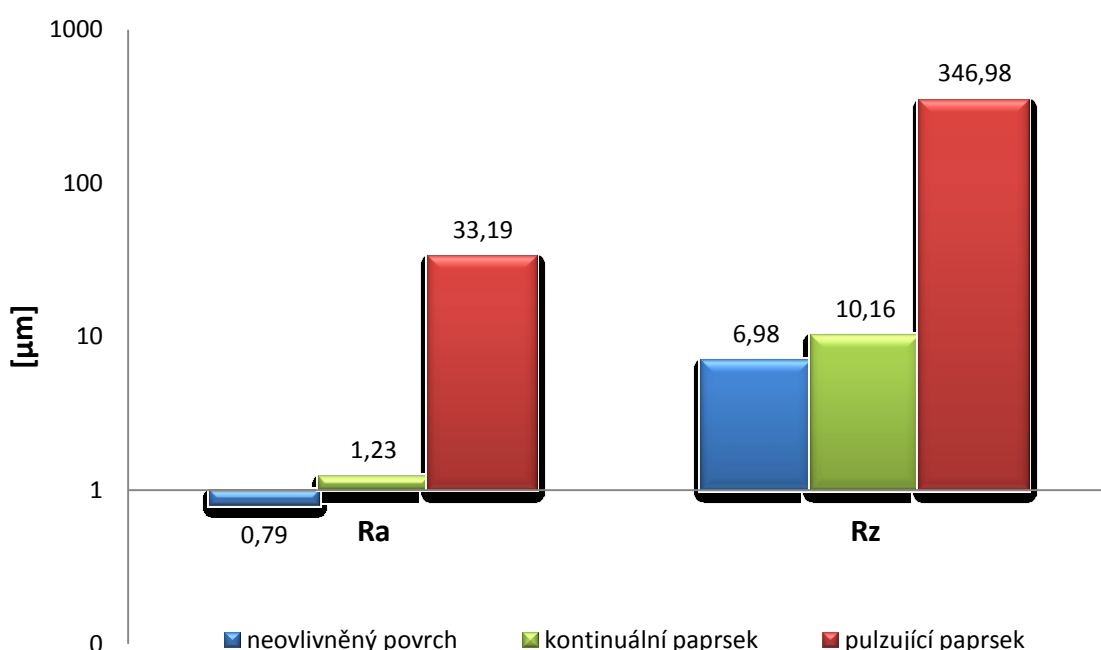
Při rychlosti posuvu  $v_p = 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  do  $5,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  jsou hodnoty parametru špičatosti posuzovaného profilu  $Rku$  od 3,8 do 5,8. Při vyšších rychlostech posuvu nejsou naměřené hodnoty  $Rku$  již tak výrazné, ale stále jsou větší než 3. Z analýzy dat tedy vyplývá, že povrch vytvořený technologií pulzujícího vodního paprsku by mohl mít dobrý kotvící profil pro následné nanášení povlaků.



Obrázek 6.14 – Závislost špičatosti posuzovaného profilu  $Rku$  na rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$ .

Pro znázornění desintegračních účinků pulzujícího vodního paprsku na povrch materiálu bylo provedeno porovnání parametrů drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$  pro neovlivněný povrch, povrch po aplikaci kontinuálního paprsku, povrch po aplikaci PWJ (viz obr. 6.15).

Při podmínkách experimentu (materiál EN AW 5083, vzdálenost  $L = 55$  mm, rychlost posuvu  $v_p = 1$  mm·min<sup>-1</sup>, tlak kapaliny  $p = 20$  MP) vidíme na obrázku 6.15, že povrch před aplikací PWJ a WJ má nejnižší hodnoty drsnosti  $R_a$ . Následuje povrch ovlivněný vodním paprskem bez pulzací, kdy hodnota  $R_a = 1,23$  μm. Výrazně vyšších hodnot střední aritmetické úchyly profilu  $R_a = 33,19$  μm dosahuje povrchu až po aplikaci technologie PWJ. Z tohoto porovnání vyplývá jak velký desintegrační účinek má pulzující vodní paprsek na výslednou topografii povrchu materiálu.



Obrázek 6.15 – Porovnání parametrů drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  v logaritmickém měřítku: neovlivněný povrch, povrch po aplikaci kontinuálního paprsku ( $v_p = 1$  mm·s<sup>-1</sup>), povrch po aplikaci PWJ ( $v_p = 1$  mm·s<sup>-1</sup>).

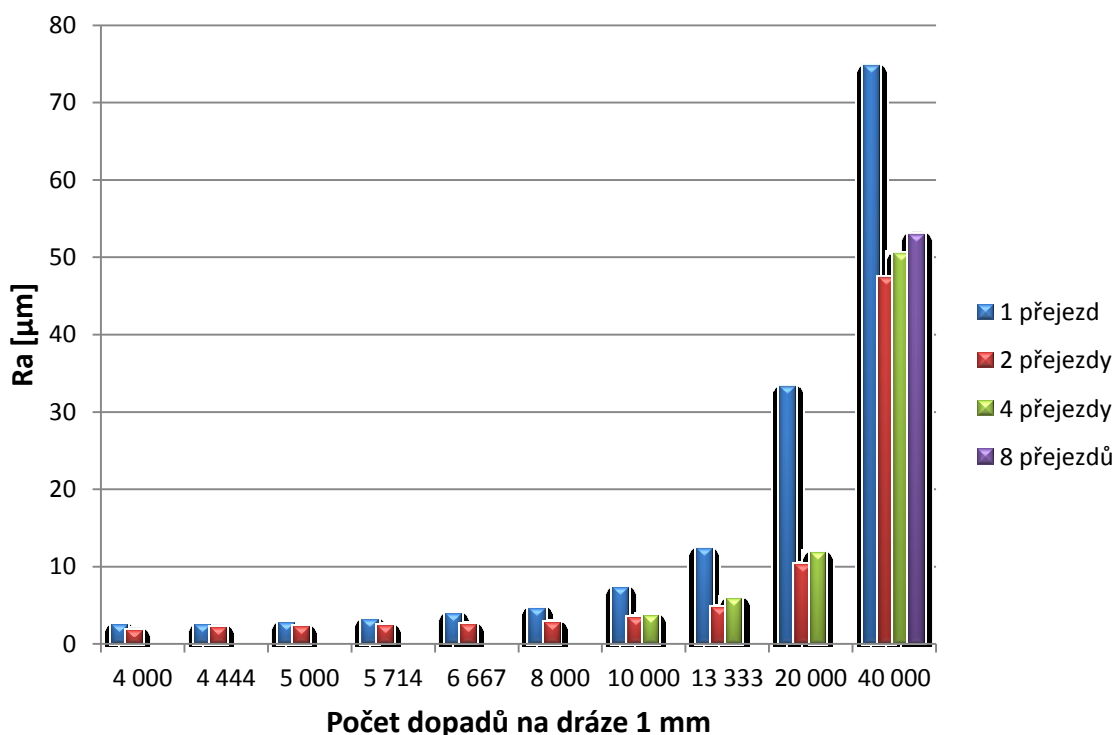
Tabulka 6.6 – Hodnoty parametrů drsnosti povrchu  $R_a$ ,  $R_z$  po aplikaci PWJ.

č. drážky	$v_p$ [mm·s <sup>-1</sup> ]	Počet přejezdů	$R_a$ [μm]	$R_z$ [μm]
1	0,5	2	70,32	543,24
2	1	2	47,18	381,08
3	1,5	2	19,89	194,52
4	2	2	10,06	111,55
5	2,5	2	6,25	66,85
6	3	2	4,61	50,12
7	3,5	2	3,46	35,74
8	4	2	3,27	35,56
9	4,5	2	3,01	32,52
10	5	2	2,66	36,93
11	5,5	2	2,44	27,24
12	6	2	2,39	25,17
13	6,5	2	2,42	25,79
14	7	2	2,25	24,11
15	7,5	2	2,12	22,39
16	8	2	2,14	23,87
17	8,5	2	2,09	20,42
18	9	2	2,09	19,45
19	9,5	2	1,93	17,06
20	10	2	1,73	14,56
21	2	4	50,41	446,48
22	4	4	11,72	151,17
23	6	4	5,77	63,67
24	8	4	3,58	39,19
25	4	8	52,86	406,57

Na vzorcích s vyšším počtem přejezdů byl pozorován efekt sčítání dezintegračních účinků PWJ a tím i zvyšování hodnot parametrů drsnosti povrchu. Obrázek 6.16 zobrazuje porovnání drsnosti  $R_a$  při různém počtu přejezdů nad povrchem materiálu. Při rychlosti posuvu  $v_p = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  na dráze 1 mm působí na povrch přibližně 4000 dopadů jednotlivých částí pulzujícího paprsku. Při rychlosti  $v_p = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  je to už jenom 2000 dopadů. Když tedy rychlostí  $v_p = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  přejedeme povrch dvakrát, získáme stejný

počet dopadů. Takto můžeme porovnat vliv různých počtů přejezdů při stejném počtu dopadů na výslednou topografii povrchu.

Na obrázku 6.16 je vidět, že při jednom přejezdu nižší rychlostí je drsnost  $R_a$  vyšší ve všech případech oproti dvěma přejezdům dvojnásobnou rychlostí. U počtu 4 a 8 přejezdů se hodnota střední aritmetické úchyly profilu  $R_a$  mírně zvyšuje oproti dvěma přejezdům, ale stále je nižší než u přejezdu jednoho. Jedním z možných vysvětlení je, že povrch již jednou zdrsňený má větší schopnost odolávat dalšímu působení PWJ. Čelo dopadajícího paprsku se při dopadu na zdrsňený povrch rozbije po částech o vrcholky povrchu materiálu a nemá tak kompaktní účinek. Následná radiální síla paprsku tekoucího po povrchu tyto vrcholky odstraňuje a snižuje částečně drsnost povrchu  $R_a$ . Jednou z dalších možností může být zpevnění povrchové vrstvy při předchozím průjezdu.



Obrázek 6.16 – Vliv střední aritmetické úchyly profilu  $R_a$  na počtu dopadů na dráze 1 mm.

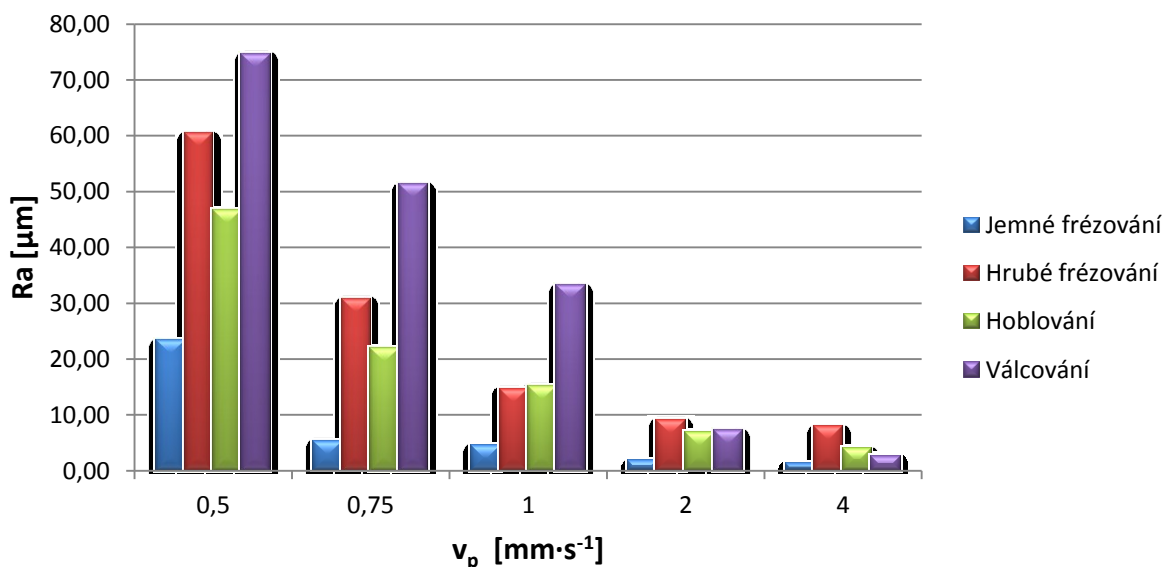
V tabulce 6.7 jsou uvedeny hodnoty parametru  $Ra$  ve vztahu k rychlosti posuvu nástroje nad povrchem  $v_p$  a povrchové úpravě materiálu vzorků (jemné frézování, hrubé frézování, hoblování, válcování).

Tabulka 6.7 – Naměřené parametry povrchu vytvořeného technologií PWJ.

Povrchová úprava materiálu EN AW 5083	$Ra [\mu\text{m}]$					
	před aplikací PWJ	$v_p [\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$				
		4	2	1	0,75	0,5
<b>Jemné frézování</b>	0,9	1,4	1,87	4,51	5,42	23,40
<b>Hrubé frézování</b>	4,5	7,89	9,20	14,71	30,82	60,34
<b>Hoblování</b>	2,6	3,97	6,83	15,19	21,94	46,59
<b>Válcování</b>	0,5	2,64	7,16	33,19	51,29	74,63

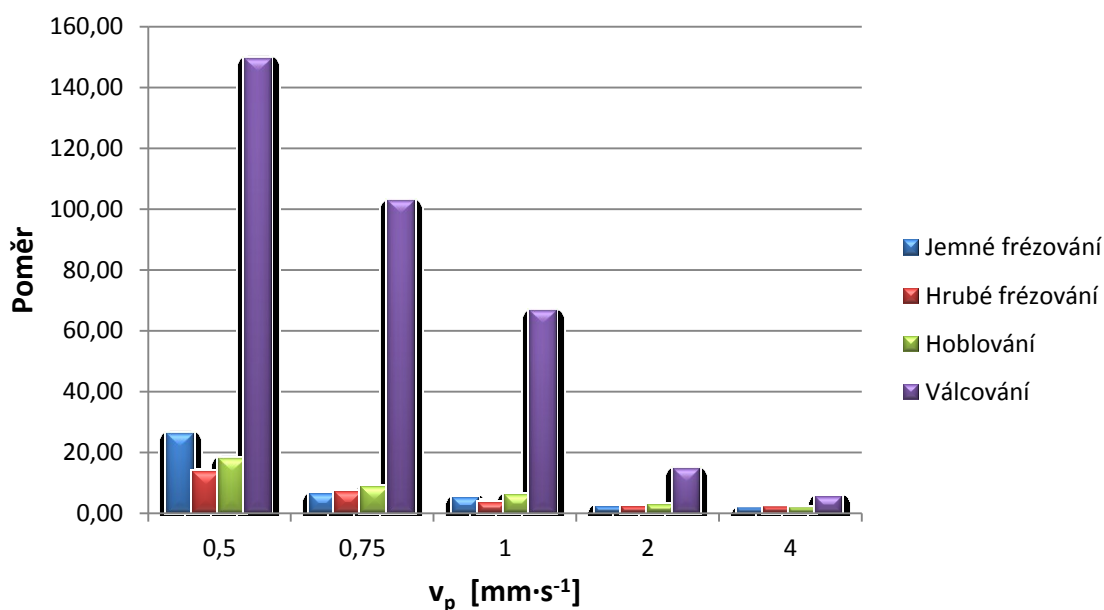
Nejméně zdrsňený povrch s průměrnou hodnotou  $Ra = 0,5 \mu\text{m}$  má technologie válcování. Tato hodnota byla naměřena ve směru kolmém na směr válcování. Drsnost  $Ra = 0,9 \mu\text{m}$  na povrchu vytvořila technologie jemného frézování. Technologie hoblování vykazovala drsnost  $Ra = 2,6 \mu\text{m}$  ve směru kolmém na směr pohybu hoblovacího nože. Nejdrsňější povrch s hodnotou  $Ra = 4,5 \mu\text{m}$  vytvořila technologie hrubého frézování.

Povrchová úprava materiálu měla výrazný vliv na výslednou topografii povrchu po aplikaci pulzujícího vodního paprsku (viz tab. 6.7). Na obrázku 6.17, který ukazuje drsnost  $Ra$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_p$  při různé výchozí topografii povrchu vytvořené technologií frézování hrubé a jemné, hoblování a válcování. U rychlosti  $v_p = 4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  lze pozorovat, že drsnost  $Ra$  se příliš neliší od hodnot drsnosti před aplikací PWJ. Nejdrsňější je proto povrch hrubě frézovaný, následuje povrch hoblovaný, pak válcovaný a nakonec povrch jemně frézovaný. U rychlosti  $v_p = 2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  už má aplikace PWJ větší účinek a mění se pořadí pro válcovaný povrch. Rychlost posuvu  $v_p = 1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  má silný účinek na povrch a u válcovaného povrchu dochází k velmi výraznému nárůstu hodnoty střední aritmetické úchyly profilu  $Ra$ . Naproti tomu u povrchu hrubě a jemně frézovaného se hodnoty parametru  $Ra$  příliš výrazně nemění. U rychlosti posuvu  $v_p = 0,75 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  je u jemně frézovaného povrchu stále nízká hodnota  $Ra$ . U ostatních povrchů hodnota  $Ra$  výrazně roste.



Obrázek 6.17 – Vliv střední aritmetické úchytky profilu  $R_a$  na rychlost posuvu  $v_p$ .

Pokud se podíváme na obrázek 6.18, který zobrazuje poměr hodnoty drsnosti  $R_a$  před a po aplikaci PWJ zjistíme, že válcovaný povrch při rychlosti posuvu  $v_p = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  zvýšil svou drsnost 150krát. U ostatních je to kolem 20krát. Potvrzují se domněnky, že povrchy s výraznou drsností (hrubé frézování) narušují účinek PWJ a zároveň radiální proudění kapaliny po povrchu zarovnáva předchozí výstupky. U povrchu vytvořeného jemným frézováním jsou hodnoty  $R_a$  blízké povrchu válcovaného a po aplikaci PWJ je tento rozdíl již velmi výrazný. Toto může být způsobeno zpevněním povrchové vrstvy při obrábění frézováním a tím pádem větší odolnost proti působení PWJ.



Obrázek 6.18 – Poměrná hodnota drsnosti  $R_a$  mezi původním povrchem a povrchem ovlivněným PWJ při různých rychlostech posuvu  $v_p$ .

## 7 ZÁVĚR

Úvodní kapitoly diplomové práce se věnují popisu historie kapalinového paprsku. Je zde uvedeno schematické rozdělení kapalinových paprsků a klasifikace pulzujících paprsků, kde jsou podrobněji popsány jednotlivé druhy pulzujících vodních paprsků.

Dále je podrobněji popsána technologie pulzujícího vodního paprsku, princip působení na povrch materiálu a popis jednotlivých částí zařízení, které je využíváno pro tuto technologii. Je zde uvedeno zhodnocení měřících metod topografie povrchu. Efekty dopadu pulzujícího vodního paprsku na povrch experimentálně vytvořených vzorků, byly studovány optickým profilometrem MicroProf FRT. K popisu nově vytvořené vrstvy materiálu po aplikaci PWJ byly vybrány výškové parametry drsnosti  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rsk$ ,  $Rku$ .

V předmětné práci jsou prezentovány výsledky získané z topografie povrchu materiálu EN AW 5083 před a po aplikaci technologie WJ a PWJ. Dále pak topografie povrchu, u kterého byla provedena povrchová úprava technologiemi hrubého a jemného frézování, hoblování. Povrchová úprava materiálu měla velký vliv na výslednou topografii povrchu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem (viz. obr. 6.18).



## LITERATURA

- [1] ADAMCZAK, S; MAKRENEK, M; SUCHAŃSKA, M; ŚWIDERSKI, J. Possibility of Applications of CSI Methods in studies C-Pd films. Poster. 2010, Zakopane, Poland.
- [2] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B.: *Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu. Kvalita a geometrické specifikace produktů*, 2005 p.1-3 ISBN1801-5352.
- [3] BINNING, G., ROHRER, H. Scanning tunneling microscopy. *IBM Journal of Research and Development*. vol. 44. Is. 1-2. January 2000. p. 279-293.
- [4] BINNING, G., QUATE, F. C., GERBER, CH. Atomic Force Microscope. *Physical review letters*. vol. 56, no 9. p. 930 – 933. 1986
- [5] ČSN EN ISO 4287:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [6] ČSN EN ISO 4288:1996. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [7] FOLDYNA, J. *Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků. Kandidátská disertační práce*. Akademie věd České republiky, Ústav geoniky Ostrava. 1996. 67 s., přílohy 29 s.
- [8] FOLDYNA, J. Rozvoj technologie pulsujících vodních paprsků. In *Sborník příspěvků mezin. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2009[CD]*, ÚGN 2009, pp. 48 - 63, ISBN 978-80-86407-81-4.
- [9] FOLDYNA, J., SITEK, L. 2001. Modulated vs. Continuous Jets: Performance Comparison. *Proceedings of the 2001 WJTA American Waterjet Conference*, Hashish (ed.), WTJA, p. 523-535.
- [10] FOLDYNA, J. SITEK, L., SVEHLA, B., SVEHLA, S. Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects.
- [11] FOLDYNA, J., L. SITEK, J. SCUCCA, P. MARTINEC, J. VALICEK, AND K. PALENIKOVA. 'Effects of Pulsating Water Jet Impact on Aluminium Surface', *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 209, No. 20, 6174-6180, 2009.

- [12] FOLDYNA J., VIJAY M. M. 1994. Potential of Ultrasonically Modulated Pulsed Water Jets for Cutting of Metals. *Manufacturing Science and Engineering* 1994, Volume 1, ASME, New York, USA, p. 397-404.
- [13] GOLDSTEIN, J., NEWBURY D.E., JOY, D.C., LYMAN, C.E., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., SAWYER, L., MICHAEL, J.R. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. 3rd ed. Springer. 2003. ISBN 978-0-306-47292-3.
- [14] HAWRYLEWICZ, B. M., PUCHALA, R. J., VIJAY, M. M. Generation of pulsed or cavitation jets by electric discharges in high speed continuous water jets. In 8th International Symposium on Jet Cutting Technology, page 345/352, 1986.
- [15] HLAVÁČ, L. *Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi: doktorská práce*, Katedra automatizace v hornictví, HGF VŠB-TUO, Ostrava, 2000.
- [16] CHAHINE, G. L., CONN, A. F., JOHSON, JR., FREDERIK, J. S. „Cleaning and cutting with self-resonating pulsed water jets“. In *Proceedings of the 2nd U.S. Water Jet Conference*, page 195/207, 1983.
- [17] KLICH, O. *Vliv technologických parametrů na topografii povrchu materiálu vytvořených pulzujícím vodním paprskem. Bakalářská práce*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 37 s.
- [18] KLICH, J. FOLDYNA, J. HLAVACEK, P. ZELENÁK, M. SCUČKA, J. Influence of number of pulses impact on surface topography generated by the action of pulzating water jet. *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2011*, Fukuoka, Japan, p. 69-74, ISBN 978-4-9902356-1-1.
- [19] KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: Miroslav Mračko, 2001, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [20] LONGRIDGE, C. C. Hydraulic mining. Publ. *Mining Journal*. 1910
- [21] SITEK, L. *Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření: doktorská disertační práce*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2000, 110 s., 3 příl.
- [22] SUMMERS, D., A. *Waterjetting technology*. Oxford, 1995. 882 p. ISBN 0-419-19660-9.

- [23] ÚSTAV GEONIKY AV ČR, v.v.i., Ostrava. Způsob generování tlakových pulzací a zařízení pro provádění tohoto způsobu. Původce vynálezu: Josef FOLDYNA, Branislav ŠVEHLA. E 21 C 45/02, E 21 C 45/00, B 08 B 3/00, B 05 B 17/06. Česká republika. 299412. 15.03.2005.
- [24] VALÍČEK, J., HLOCH, S. *Using the acoustic sound pressure level for quality prediction of surfaces created by abrasive waterjet*, In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 48, Issue: 1 - 4, p. 193 - 203, 2010, ISSN 0268-3768
- [25] VALÍČEK, J; HLOCH, S; KOZAK, D. *Study of Surface Topography Created by Abrasive Waterjet Cutting*. Slovanski Brod, Strojarski fakultet u Slovanskem Brodu, 2009. ISBN 978-953-6048-48-9
- [26] VIJAY, M. M. „Pulsed jets: fundamentals and applications“. In: Proceedings in the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, page 610/627, 1998.
- [27] VIJAY, M. M. 1992. Ultrasonically generated cavitating or interrupted jet, U. S. Patent No. 5,154,347.
- [28] VIJAY, M. M., DEBS, E., PAQUETTE, N., PUCHALA, J. R., BIELAWSKI, M. „Removal of coatings with low pressure pulsed water jets“. In Proceedings of the 9th American Water jet Conference, page 563 - 580, 1997.
- [29] VIJAY, M. M., FOLDYNA, J. „Ultrasonically modulated pulsed jets“. In 12th International Conference on Jetting Technology, page 15 - 36, 1994.
- [30] VIJAY, M. M., FOLDYNA, J. „Ultrasonically modulated pulsed water jets: Effect of the frequency on the performance“. In Proceedings of the International Conference Geomechanics 96, page 303 - 308, 1997.
- [31] VIJAY, M. M., YAN, W. AND MAKOMANSKI, A. Application of ultra-powerful pulsed water jet generated by elektrodischrges. In 16th International Conference on Water Jetting. BHR Group, 2002.
- [32] WHITEHOUSE, D.J. Surface metrology. *Measurement Science & Technology*, 1996, p. 955-972. ISSN 0957-0233.
- [33] YAN, W., TIEU, A., VIJAY, M.M. Applications of ultra-powerful pulsed waterjet generated by electrodischarges., VLN Advanced Technologies Inc, CanadaA. Makomaski, Consultant, Canada.

- [34] YONG, Y. K., MOHEMAMI, S. O. R. Design of an Inertially Counterbalanced Z-Nanopositioner for High-Speed Atomic Force Microscopy. *IEEE TRANSACTIONS ON NANOTECHNOLOGY*. Vol. 12 Is. 2 Pages: 137-145. 2013. ISSN: 1536-125X
- [35] ZELENÁK M. et al. Analogy of abrasive waterjet technology with classical technologies. *Technologické inženýrství*, 2009, Vol. 6, No. 2. ISSN 1336-5967
- [36] ZELENÁK, M. *Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace. Doktorská disertační práce.* Institut fyziky, HGF VŠB-TUO, Ostrava, 2012. 110 s.
- [37] [28.4.2013, 18:00]. Dostupné na WWW: <<http://www.directindustry.com/prod/calder-pressure-systems/process-piston-pumps-40447-377462.html>>
- [38] [30.4.2013, 17:00]. Dostupné na WWW: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Round\\_and\\_flat\\_jet\\_nozzles.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Round_and_flat_jet_nozzles.jpg)>
- [39] [30.4.2013, 18:00]. Dostupné na WWW: <<http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>>